

В. Н. ЛОГИНОВ

**Электрические
измерения
механических
величин**



МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 744

В. Н. ЛОГИНОВ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ
МЕХАНИЧЕСКИХ
ВЕЛИЧИН



«ЭНЕРГИЯ»

МОСКВА 1970

6Ф2.08

Л.69

УДК 531.7.082.7

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Берг А. И., Борисов В. Г., Бурдейный Ф. И., Бурлянд В. А.,
Ванеев В. И., Геништа Е. Н., Жеребцов И. П., Канаева А. М.,
Корольков В. Г., Кренкель Э. Т., Куликовский А. А., Смирнов А. Д.,
Тарасов Ф. И., Шамшур В. И.

Логинов В. Н.

Л 69 Электрические измерения механических вели-
чин, М., «Энергия», 1970.

80 с. с илл. (Массовая радиобиблиотека. Вып. 744).

Рассматриваются физические основы и методы преобразования
механических величин в электрические сигналы, принципы построения
приборов и способы их калибровки; приводятся справочные данные
по промышленным приборам.

Книга рассчитана на подготовленных радиолюбителей.

3-4-5
352-69

6Ф2,03

Логинов Виктор Николаевич

Электрические измерения механических величин

Редактор Н. М. Поляков

Технический редактор Л. Н. Кузнецова

Корректор Г. Г. Желтова

Сдано в набор 15/X 1969 г.

Подписано к печати 17/VI 1970 г.

Т-09757

Формат 84×108^{1/32}

Бумага типографская № 2

Усл. печ. л. 4,2

Уч.-изд. л. 5,35

Тираж 40 000 экз.

Цена 23 коп.

Зак. 2630

Издательство «Энергия». Москва, Ж-114, Шлюзовая наб., 10.

Московская типография № 10 Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР.
Шлюзовая наб., 10.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	4
Глава первая. Общие сведения об электрических приборах для измерения неэлектрических величин	5
Глава вторая. Преобразователи механических величин в электрические	7
1. Резистивные преобразователи	7
2. Емкостные преобразователи	22
3. Пьезоэлектрические преобразователи	27
4. Электромагнитные преобразователи	32
5. Электронные преобразователи (механотроны)	40
Глава третья. Датчики и схемы электрических приборов для измерения механических величин	42
1. Колебательная система в качестве измерительной системы	42
2. Датчики для измерения механических величин	49
3. Элементы и схемы усилительных устройств	63
4. Указывающие и регистрирующие приборы	72
Глава четвертая. Калибровка измерительных приборов	76
1. Калибровка приборов для измерения сил и давлений	76
2. Калибровка виброметров и акселерометров	77

ПРЕДИСЛОВИЕ

Постоянное и все возрастающее использование в науке и промышленности автоматики, телемеханики и телеизмерений связано в большинстве своем с измерением неэлектрических величин и передачей результатов измерений на расстояние. Широкое внедрение электрических методов для измерения неэлектрических величин определяется преимуществами, которыми они обладают по сравнению с другими методами, и прежде всего возможностью дистанционных измерений, относительно простым усилением сигнала, высокой чувствительностью измерительных средств, большим динамическим диапазоном измерений одним прибором, малой инерционностью измерительных устройств, простотой хранения и обработки информации и т. д.

Из многочисленных возможностей использования электрических методов для измерения неэлектрических величин в настоящей брошюре рассматривается измерение только механических величин. Для этих измерений могут быть применены различные принципы с использованием приборов, отличающихся по сложности, стоимости, весу, объему и т. д. При этом следует иметь в виду, что для решения конкретной задачи не все методы одинаково подходящи и равноценны и что каждому из них присущи определенные достоинства и недостатки.

К сожалению, до сих пор наблюдаются случаи, когда при проведении измерений не всегда ощущают тонкости методики эксперимента, в результате чего получаются ошибочные результаты.

В предлагаемой брошюре ставится задача оказания методической помощи электрикам, радистам в проведении экспериментов.

Очевидно, что дать рекомендации и описания приборов для всех возможных измерений не представляется возможным и если в брошюре рассматриваются некоторые конструкции, то лишь для того, чтобы на их примере подчеркнуть или пояснить то или другое положение.

Читатель заметит, что описанию различных типов преобразователей в брошюре отведено далеко не одинаковое место; этот отбор сделан, исходя из распространенности их в повседневной практике.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРИБОРАХ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Приборы для измерения неэлектрических величин состоят из двух основных частей: преобразователя и измерительного устройства. Очень часто между этими частями имеются вспомогательные элементы (провода, кабели, аттенюаторы и согласующие устройства), а измерительный прибор разбивается на ряд блоков: усилительное устройство, измерительный или регистрирующий прибор и блок питания.

Структура большинства электрических приборов для измерения неэлектрических величин может быть представлена блок-схемой, изображенной на рис. 1.

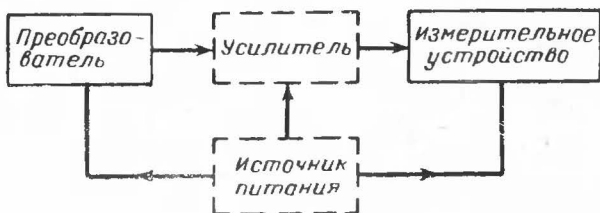


Рис. 1. Блок-схема прибора для измерения неэлектрических величин.

Назначение каждого из узлов весьма четко определено его наименованием. Первый из них — преобразователь — является устройством, обеспечивающим восприятие измеряемой входной величины (скорости, давления и т. п.) и преобразование ее в величину, удобную для передачи по линиям связи, усиления, измерения или регистрации электрическими средствами.

Наряду с термином «преобразователь» в технической литературе часто встречается другой термин — «датчик», имеющий одинаковое с первым значение. В настоящей брошюре под «датчиком» понимается конструктивно законченный преобразователь, предназначенный для выполнения определенной функции (например, датчик давления, датчик скорости) безотносительно к заложенному в нем принципу преобразования. В случае, когда необходимо одновременно характеризовать и принцип преобразования, в название датчика

включается соответствующее определение, например пьезоэлектрический датчик давления и т. д.

Усилительный блок, равно как и блок питания, не является неотъемлемой частью измерительного прибора. В ряде случаев эти блоки могут отсутствовать, например при измерении скорости вращения с помощью индукционного тахогенератора и чувствительного гальванометра. Иногда усилительный блок разбивается на два блока: согласующий каскад (часто катодный повторитель) и основной усилитель. Такое разделение имеет место, в частности, при применении пьезоэлектрических преобразователей, устанавливаемых далеко от измерительного блока. В этом случае катодный повторитель с большим входным сопротивлением располагается вблизи преобразователя, в результате чего длинный кабель (иногда до 100—200 м), подключенный к низкоомной нагрузке повторителя, не оказывает заметного влияния на измерения.

Неэлектрические величины, преобразованные в электрические напряжение или ток, измеряются или регистрируются соответствующим устройством. В качестве измерительного устройства часто используются показывающие стрелочные и цифровые приборы, а в качестве регистрирующих устройств — различные самописцы, осциллографы и магнитные регистраторы.

Структурные схемы реальных приборов в большинстве случаев значительно сложнее приведенной на рис. 1 и нередко включают устройства для передачи информации об измеряемой величине по радио, коммутатор для проведения многоточечных измерений и т. д.

Для дальнейшего изложения введем некоторые определения.

Входная величина — механическая величина, действующая на преобразователь и трансформируемая последним в электрический сигнал.

Выходная величина — величина, получаемая на выходе прибора как результат преобразования, усиления и других трансформаций.

Чувствительность устройства — отношение изменения выходной величины Δy к изменению входной величины Δx ($S = \Delta y / \Delta x$); ее размерность определяется размерностью входной и выходной величин.

Общая чувствительность прибора, состоящего из последовательного ряда блоков и преобразователей, зависит от чувствительности каждого из узлов и определяется произведением частных чувствительностей ($S = S_1 \cdot S_2 \dots$).

Порог чувствительности — минимальное изменение входной величины, которое можно уверенно обнаружить с помощью данного преобразователя.

Предел преобразования — максимальное значение входной величины, которое может быть воспринято преобразователем без искажений и без повреждения самого преобразователя.

Динамический диапазон измерения — диапазон входных величин, измерение которых производится без заметных искажений и простирается от максимальной (предельной) величины до минимальной, ограниченной порогом чувствительности или уровнем помех.

Основная погрешность — максимальная разность между получаемой и номинальной выходными величинами, определяемыми по статической характеристике для данной входной величины при нормальных условиях.

Нормальные условия — за нормальные условия принимается следующее состояние окружающей среды: температура $+20 \pm 5^\circ \text{C}$; атмосферное давление $760 \pm 20 \text{ мм рт. ст.}$, относительная влажность $60 \pm 20\%$; вибрации, электрические и магнитные поля должны отсутствовать.

Дополнительная погрешность — погрешность, вызываемая изменением внешних условий. Она представляет собой относительное изменение выходной величины в процентах, отнесенное к изменению внешнего фактора на определенную величину (например, температурная погрешность $2,5\%$ на 10°C и т. д.).

ГЛАВА ВТОРАЯ

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН В ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ

Преобразователь механической величины в электрическую является одним из основных элементов измерительного прибора. Выбор преобразователя в значительной степени предопределяет выбор схемы усилительного устройства и блока питания. Поэтому выбору преобразователя следует уделять особое и пристальное внимание.

По принципу работы преобразователи делятся на два основных типа: активные или генераторные и пассивные или параметрические. В первых входная величина непосредственно преобразуется в электрический сигнал; во вторых выходными величинами являются изменения электрических параметров схем: сопротивлений, емкостей, частоты и т. д. К первому типу относятся пьезоэлектрические и индукционные преобразователи, а ко второму — емкостные, индуктивные и др. В отличие от параметрических, питаемых от внешнего источника, активные преобразователи под воздействием измеряемой величины, сами генерируют электрические сигналы с соответствующими напряжениями, частотой или фазой переменного тока.

В случае, когда непосредственное преобразование входной величины в выходную произвести не удастся, применяется промежуточное преобразование, например, в тензометрических преобразователях, где измеряемая величина (например, сила) преобразуется в деформацию упругого элемента, которая приводит к изменению электрического сопротивления.

Для измерения одной и той же механической величины могут быть использованы датчики, основанные на различных принципах преобразования, которых существует весьма много, но которые не всегда равнозначны по возможностям, обеспечению точности и т. д. Поэтому в дальнейшем рассматриваются только те принципы, которые, по нашему мнению, наиболее подходящи, а преобразователи и датчики с их использованием получаются проще, надежнее и достаточно разработаны с конструктивной и принципиальной стороны.

1. РЕЗИСТИВНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Резистивные преобразователи являются наиболее распространенным видом преобразователей. К ним относятся контактные, реостатные, тензоэлектрические, тензолитовые и другие преобразователи.

Однако из всего многообразия наибольшее распространение получили лишь первые три типа.

Контактные преобразователи

Контактными преобразователями называются такие преобразователи, у которых входная величина (например, механическое перемещение или ускорение) вызывает замыкание или размыкание контактов, управляющих электрической цепью.

Простейший контактный преобразователь (рис. 2,а) имеет одну пару контактов, замыкаемых (или размыкаемых) при соответствующем перемещении щупа *Щ*, осуществляющего контроль, например, толщины движущейся ленты.

На рис. 2,б изображена другая схема преобразователя, отличающегося большим количеством контактов и способного реагировать на перемещение щупа в обе стороны от начального («нулевого») положения, а на рис. 2,в — схема многопредельного преобразователя.

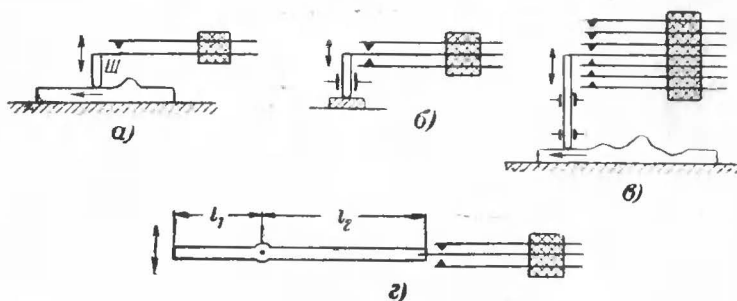


Рис. 2. Основные типы контактных преобразователей.

Особенностью контактных преобразователей является дискретность измерения: контакты замыкаются (или размыкаются) при вполне определенных, наперед заданных перемещениях щупа, на которые отрегулирована контактная система.

Расширение пределов измерения перемещения может быть произведено с помощью рычага второго рода (рис. 2,в). В зависимости от соотношения плеч l_1 и l_2 можно получить увеличение или уменьшение перемещения подвижного контакта по сравнению с перемещением щупа.

Надежность и точность контактных преобразователей зависят в первую очередь от материала и качества изготовления контактов. Материал для контактов выбирают, исходя из предполагаемых условий работы: контактного давления, мощности управляемой цепи, напряжения и т. д. Наиболее подходящими для контактов являются серебро, платина, вольфрам, сплавы платины с иридием и др.

Погрешность срабатывания контактных преобразователей находится в пределах 1—2 мкм.

Реостатные преобразователи

Реостатным преобразователем называется реостат, движок которого перемещается в соответствии со значением измеряемой неэлектрической величины. Таким образом, естественной входной величиной реостатных преобразователей является перемещение движка, которое может быть либо линейным, либо угловым. Выходной величиной реостатных преобразователей является активное сопротивление, распределенное линейно или по некоторому закону перемещения движка.

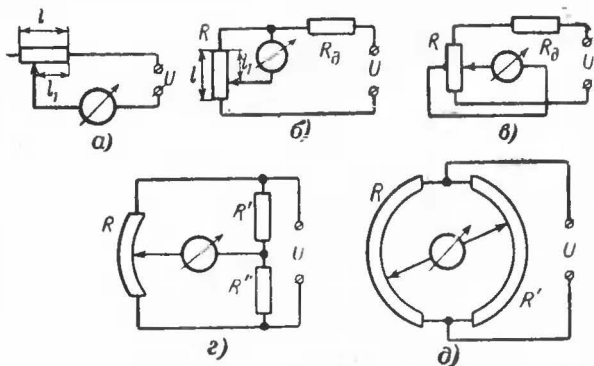


Рис. 3. Схемы включения реостатных преобразователей.

Конструктивно реостатные преобразователи выполняются как проводом, намотанным на каркас, так и реохордного типа. Для изготовления реостатов обычно применяют константановую, манганиновую, а для работы в условиях высоких температур — фехрелевую проволоку. В особо ответственных случаях применяют проволоку из сплавов платины с иридием, палладием или рутением.

Каркас преобразователя изготавливается из текстолита, стеклотекстолита или пластмассы; применяются также каркасы из алюминиевых сплавов, покрытых изоляционным лаком или оксидной пленкой. Последние более термостойчивы, что позволяет повысить плотность тока в обмотке и тем самым повысить чувствительность преобразователя.

Формы каркасов весьма разнообразны: они могут быть выполнены в виде плоской или цилиндрической пластины, плоского или цилиндрического кольца, плоского сегмента и т. д.

Величина реактивного сопротивления реостатных преобразователей весьма мала; поэтому ее можно не принимать во внимание до частот порядка нескольких десятков тысяч герц.

Аналогично контактным реостатные преобразователи являются ступенчатыми (за исключением преобразователей реохордного типа), поскольку непрерывному изменению измеряемой величины соответствует ступенчатое изменение сопротивления, равное величине сопротивления одного витка. Это обстоятельство вызывает определенную погрешность измерения, которая уменьшается с увеличением

числа витков преобразователя на единицу измеряемой величины, вследствие чего общее число витков преобразователя обычно выбирают не менее 100—200.

Наиболее распространенные схемы включения реостатных преобразователей приведены на рис. 3.

Недостатком первых трех схем является нелинейная зависимость тока от перемещения движка. Величина нелинейности зависит от соотношения внутреннего сопротивления гальванометра R_i , добавочного сопротивления R_d и сопротивления преобразователя R . Лишь при $R_i \rightarrow \infty$ (при использовании лампового вольтметра с большим входным сопротивлением) в потенциометрических схемах (рис. 3, б, в) связь между выходным напряжением $U_{\text{вых}}$ и смещением l_1 становится линейной

$$U_{\text{вых}} = U \frac{R}{R + R_d} \frac{l_1}{l}. \quad (1)$$

Нелинейность мостовых схем (рис. 3, г, д) обычно не велика. Это обстоятельство наряду с большей чувствительностью (по сравнению с первыми тремя схемами) послужило причиной их преимущественного применения.

Тензорезисторы

Большое распространение в качестве преобразователей получили тензорезисторы, называемые также тензометрами сопротивления или тензосопротивлениями.

В основе работы тензорезисторов лежит свойство материалов изменять свое электрическое сопротивление под действием приложенной к ним силы. Широкому применению тензорезисторов способствуют в первую очередь их малые размеры и вес, возможность измерения как статических, так и динамических деформаций и т. д.

В настоящее время имеют распространение проволочные, фольговые и полупроводниковые тензорезисторы.

Проволочные тензорезисторы. В наиболее простом случае проволочные тензорезисторы представляют собой отрезок проволоки, концы которого (или весь отрезок) жестко закрепляются с помощью клея или цемента на упруго деформируемой детали. Сжатие или растяжение детали вызывает пропорциональное растяжение или сжатие проволоки, в результате чего изменяются ее длина, поперечное сечение и удельное сопротивление, что в конечном счете приводит к изменению электрического сопротивления проволоки. Так, если в исходном состоянии электрическое сопротивление проволоки равно:

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

где ρ — удельное сопротивление материала проволоки;

l — начальная длина деформируемого участка проволоки;

S — площадь сечения проволоки,

то при растяжении проволоки ее сопротивление изменится на величину ΔR и составит $R + \Delta R$.

Относительное изменение сопротивления тензорезистора определяется соотношением

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} (1 + 2\mu),$$

где Δl — изменение длины;

μ — коэффициент Пуассона.

Частное от деления относительного изменения сопротивления $\Delta R/R$ на относительное изменение длины проводника $\epsilon = \Delta l/l$ в пределах упругой деформации характеризуется постоянной величиной, равной

$$\frac{\Delta R/R}{\epsilon} = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l} = k \quad (2)$$

и получило название коэффициента тензочувствительности, который наряду с номинальным сопротивлением R и длиной решетки (базой) l_0 является основной характеристикой тензорезистора. Величина коэффициента тензочувствительности k зависит от свойств материала, из которого изготовлен тензорезистор, и технологии его изготовления. Большое значение имеет также качество подложки (основы) и клея.

Для изготовления проволочных тензорезисторов применяются материалы, имеющие высокий коэффициент тензочувствительности и малый температурный коэффициент сопротивления (ТКР). Наиболее употребительным материалом для изготовления тензорезисторов является константановая проволока диаметром 20—30 мкм.

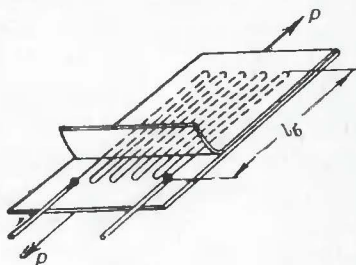


Рис. 4. Устройство проволочного тензорезистора.

Конструктивно проволочные тензосопротивления представляют собой спираль (решетку), состоящую из нескольких петель (витков) проволоки, наклеенных на тонкую бумажную или лаковую (пленочную) основу. Сверху решетка также закрыта тонкой бумагой или пленкой (рис. 4).

Для пленочной основы используются бакелитовый лак, клей БФ-2 и специальные композиции. Резисторы, изготовленные на пленке из клея БФ, работоспособны при температурах от -40 до $+70^\circ\text{C}$, а на бакелитовом лаке — до 200°C . Для измерений при более высоких температурах используются высокотемпературные датчики, приклеиваемые на клеях В-58, ВН-15 (до 400°C) или цементах Б-56, ВН-12 (до 800°C) и др.

Ассортимент проволочных тензорезисторов, выпускаемых промышленностью, достаточно разнообразен и приведен в табл. 1.

Обозначение тензорезистора: первая буква (П) указывает на то, что решетка выполнена из проволоки; материал тензорешетки представлен второй буквой (К — константан); третья буква определяет основу (Б — бумажная, П — пленочная); далее следуют величина базы и номинальное сопротивление.

Таблица 1

Обозначение тензорезистора	База, мм	Номинальное сопротивле- ние, ом	Размеры, мм	
			Длина	Ширина
Бумажная основа				
2ПКБ-5-50Х(Г)	5	50	17	8
2ПКБ-5-100Х(Г)	5	100	17	8
2ПКБ-10-100Х(Г)	10	100	22	10
2ПКБ-10-200Х(Г)	10	200	22	10
2ПКБ-20-100Х(Г)	20	100	32	9,1
2ПКБ-20-200Х(Г)	20	200	32	9,1
2ПКБ-30-200Х(Г)	30	200	42	9,1
2ПКБ-30-400Х(Г)	30	400	42	10

Пленочная основа

2ПКП-5-50X(Г)	5	50	17	8
2ПКП-5-100X(Г)	5	100	17	8
2ПКП-10-100X(Г)	10	100	22	10
2ПКП-10-200X(Г)	10	200	22	10
2ПКП-15-100X(Г)	15	100	27	10
2ПКП-15-200X(Г)	15	200	27	10
2ПКП-20-100X(Г)	20	100	32	9,1
2ПКП-20-200X(Г)	20	200	32	9,1
2ПКП-30-200X(Г)	30	200	42	9,1
2ПКП-30-400X(Г)	30	400	42	10

Коэффициент тензочувствительности указанных в таблице тензорезисторов равен $2 \pm 0,2$. Номинальный рабочий ток при наклейке на металлические детали составляет 30 мА. Максимальные допустимые относительные деформации не превышают 0,003 (т. е. 0,3%). Максимальный разброс сопротивлений тензорешеток в партии достигает $\pm 5\%$, а в группах из 5, 10 или 20 шт. не превышает $\pm 0,2\%$.

Температурный коэффициент сопротивления константановой проволоки составляет $\pm 50 \cdot 10^{-6}$ 1/град, температурный коэффициент линейного расширения $\alpha = 15 \cdot 10^{-6}$ 1/град, максимальная рабочая температура 500°С.

Иногда экспериментаторами используются тензорезисторы, не имеющие подложки — со свободным подвесом проволоки. Основным достоинством их является большая стабильность показаний при длительных измерениях (из-за отсутствия ползучести клея). Однако из-за сложности изготовления, требующего определенных навыков, такие тензорезисторы имеют ограниченное распространение.

Другой разновидностью «проволочных» тензосопротивлений являются эластичные преобразователи. Последние представляют собой резиновый или пластиковый капилляр с внутренним диаметром 0,1—0,5 мм, заполненный ртутью или электролитом и снабженный проволочными выводами. Крепление таких преобразователей к изме-

ряемому узлу производится с помощью скоб или манжет. Основное достоинство таких преобразователей — возможность измерять весьма большие деформации материалов (до 40—50%).

Фольговые тензорезисторы. Фольговые тензорезисторы являются дальнейшим развитием проволочных тензорезисторов. В отличие от последних они имеют решетку не в виде круглого провода, а тонких полосок фольги прямоугольного сечения ($\delta = 4 \div 12$ мкм), наносимых на лаковую основу. Благодаря большей площади соприкосновения полосы фольгового тензорезистора с объектом измерения его теплоотдача значительно выше, чем у проволочного, что позволяет увели-

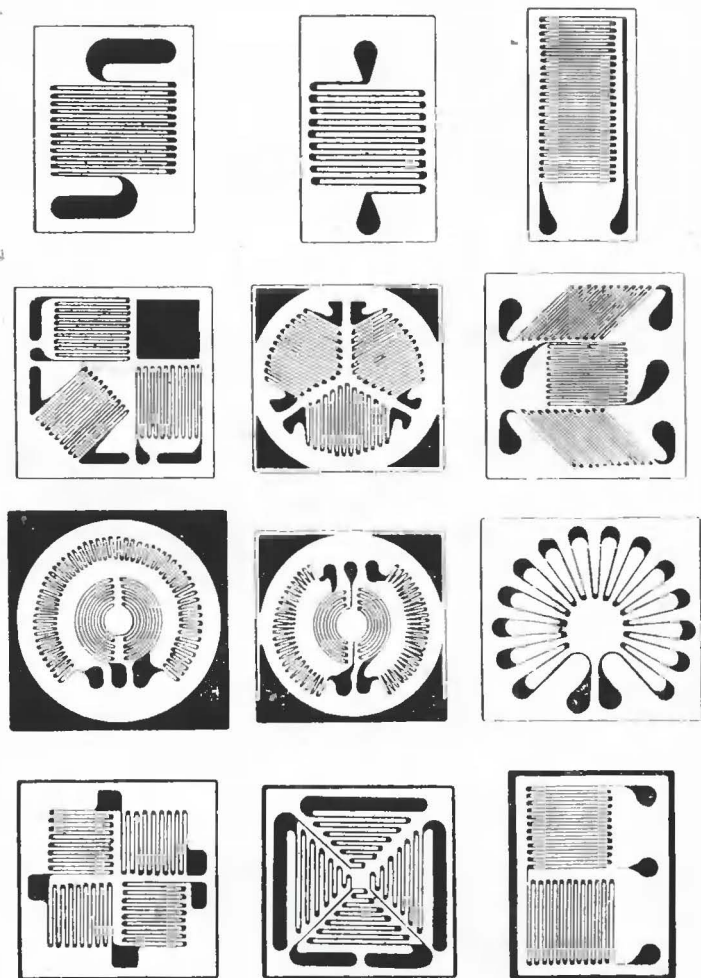


Рис. 5. Конструкции решеток фольговых тензорезисторов.

чить силу тока, протекающего через резистор (до 0,2 а), а тем самым повысить чувствительность тензопреобразователя.

Другим преимуществом фольговых тензорезисторов является возможность изготовления решеток любого рисунка (рис. 5), наиболее полно удовлетворяющих условиям измерений. Так, прямоугольные наиболее полно подходят для измерения линейных деформаций, розеточные — для измерения крутящих моментов на круглых валах, а мембранные — для наклейки на мембраны.

Номенклатура промышленных фольговых тензорезисторов приведена в табл. 2.

Принято следующее обозначение тензорезисторов: Ф — фольговая, К — константан; Прямая, Розеточная, Мембранная — конструкция решетки; конструктивные особенности (подтип); база; номинальное сопротивление; температура наклейки (Х — не более 30° С, Г — не более 180° С).

Тензочувствительность фольговых тензорезисторов такая же, как у проволочных ($k=2\pm 0,2$); предел измерения относительных деформаций 0,3%; среднее значение ползучести 0,3%; температурный диапазон работоспособности от -40 до +70° С. Максимальный разброс сопротивлений в партии не превышает $\pm 20\%$, а в группе из 5, 10 и 20 шт. для ФКПА и ФКПД $\pm 0,2\%$, а у остальных типов до $\pm 5\%$.

Полупроводниковые тензорезисторы. Появившиеся в последние годы полупроводниковые тензорезисторы имеют по сравнению с рассмотренными выше типами тензорезисторов ряд существенных преимуществ: чувствительность их в 50—60 раз выше, чем у проволочных, малые размеры, высокий уровень выходного сигнала измерительных схем, исключающий иногда применение сложных и дорогих усилителей. Кроме того, сопротивление тензорезистора при тех же размерах путем добавления соответствующих присадок к материалу датчика и изменения технологии изготовления может быть изменено в очень широких пределах (от 100 ом до 50 ком) при коэффициенте тензочувствительности от -100 до +200.

Основным отличием полупроводниковых тензорезисторов от проволочных является большое (до 50%) изменение сопротивления тензопреобразователя при деформации.

Наиболее сильно тензоэффект выражен у германия, кремния, антимонида индия, арсенида галлия и др. По ряду причин для тензорезисторов применяются в основном кремний и германий. Они обладают высокой тензочувствительностью, химически инертны, выдерживают нагрев до 500—540° С и позволяют изготавливать тензорезисторы различной формы.

Свойства и характеристики полупроводниковых тензорезисторов определяются материалом, кристаллографическим направлением, удельным сопротивлением и типом проводимости, зависящими от количества и состава примесей. У германия *n-p*-типа проводимости наибольший тензоэффект имеет место в направлении [111], у кремния *n*-типа — в направлении [100], а *p*-типа — в направлении [111]. Знак тензоэффекта (при растяжении) в полупроводниках — *n*-типа проводимости отрицательный, а *p*-типа — положительный.

Характеристики серийно выпускаемых кремниевых тензорезисторов приведены в табл. 3.

Тензорезисторы КТД имеют проводимость *p*-типа, а КТЭ — *n*-типа. Коэффициент тензочувствительности указанных тензорезисторов равен 110 ± 10 ; рабочий диапазон температур простирается от -160

Таблица 2

Тип тензорезистор	База (диаметр), мм	Номинальное сопротивле- ние, Ом	Размеры, мм	
			Длина	Ширина

Прямоугольные

2ФКПА-1-50X(Г)	1	50	7	5
2ФКПА-3-100X(Г)	3	100	9	6
2ФКПА-5-50X(Г)	5	50	11	8
2ФКПА-5-100X(Г)		100		9,5
2ФКПА-5-200X(Г)		200		6
2ФКПА-10-50X(Г)	10	50	20	11
2ФКПА-10-100X(Г)		100		13
2ФКПА-10-200X(Г)		200		13
2ФКПА-20-100X(Г)	20	100	30	9
2ФКПА-20-200X(Г)		200		15
2ФКПА-20-50X(Г)		50		24
2ФКПА-5-50X(Г)	5	100	—	37
2ФКПА-5-100X(Г)		200	—	37
2ФКПА-5-200X(Г)		200	—	37

Розеточные

2ФКРВ-3-100X(Г)	3	100	9	7
2ФКРВ-5-50X(Г)	5	50	16	16
2ФКРВ-5-100X(Г)		100	23	19
2ФКРВ-10-100X(Г)	10	100	23	21
2ФКРГ-5-50X(Г)	5	50	21	21
2ФКРГ-5-100X(Г)	10	100	30	30
2ФКРГ-10-100X(Г)		100	32	32

Мембранные

2ФКМВ-10-100X(Г)	10	100	12	12
2ФКМВ-20-50X(Г)	20	50	24	24
2ФКМВ-20-100X(Г)	30	100	34	34
2ФКМВ-30-100X(Г)		100		
2ФКМВ-30-200X(Г)		200		
2ФКМГ-20-50X(Г)	20	50	24	24
2ФКМГ-20-100X(Г)		100		
2ФКМГ-30-100X(Г)		100		
2ФКМГ-30-200X(Г)	30	200	34	34

Таблица 3

Тип тензорезистора	Удельное сопротивление, Ом·см	Номинальное сопротивление, Ом	Кристаллографическая ориентация	База, мм	Предельная мощность рассеяния
КТД-1	0,02	110	111	7±1	25
КТД-2	0,02				25
	0,045	220	111	7±1	75
КТД-3	0,045	330	111	7±1	75
КТДМ-1	0,045	55	111	3±0,5	50
КТДМ-2	0,045	110	111	3±0,5	50
КТЭ-1	0,025	90	100	7±1	25
КТЭ-2	0,025				75
	0,04	180	100	7±1	75
КТЭ-3	0,04	270	100	7±1	75
КТЭМ-1	0,04	45	100	3±0,5	50
КТЭМ-2	0,04	90	100	3±0,5	50
Гедистор	1±0,1	50—500	112	5 и 10	—

до +300° С. При этом температурный коэффициент тензочувствительности в диапазоне температур от 0 до +80° С не превышает 0,4% для *n*-типа проводимости и 0,25% для *p*-типа. Температурный коэффициент сопротивления имеет величину примерно $(5-10) \times 10^{-4} \frac{\Delta R}{R} 1/^\circ\text{C}$. Линейность изменения сопротивления сохраняется

при относительных деформациях до $\pm 0,1\%$; предельная деформация $\pm 0,4\%$.

Параметры гедистора несколько уступают параметрам кремневых терморезисторов. Так, коэффициент тензочувствительности гедистора равен всего 50, максимальная рабочая температура +45° С, а предельная относительная деформация — $1 \cdot 10^{-3}$.

К недостаткам полупроводниковых тензорезисторов следует отнести их малую механическую прочность и малую гибкость.

Другим недостатком полупроводниковых тензорезисторов является то, что, несмотря на большую тензочувствительность резисторов, реализовать ее из-за нелинейности характеристик, высокой чувствительности к воздействию внешних условий (температуры, освещения и т. д.) и существенного разброса параметров от образца к образцу оказывается довольно сложным и требуется определенный опыт.

Вызванное деформацией изменение сопротивления тензорезисторов весьма мало и колеблется от единиц миллиом до нескольких десятых долей ома. Для измерения этих изменений используются в основном две схемы: потенциометрическая и мостовая (рис. 6).

Потенциометрическая схема (рис. 6,а) состоит из источника питания и последовательно соединенных резисторов R_1 и R_2 , из которых один (R_2) или оба могут быть тензорезисторами. В последнем случае тензорезистор R_1 устанавливается на упругий элемент таким образом, чтобы его деформация имела обратный знак, чем у тензорезистора R_2 . Для исключения на выходе схемы постоянной составляющей напряжения V в схему включен конденсатор C .

Условимся в дальнейшем тензорезистор, к которому приложено усилие, называть активным, а недеформируемый — пассивным.

Если в схеме (рис. 6, а) резистор R_2 является активным тензорезистором, изменяющим свою величину в результате деформации на ΔR_2 , а резистор R_1 является пассивным элементом ($R_1 = \text{const}$), то при условии, что сопротивление нагрузки $R_H \gg R_2$, напряжение сигнала будет:

$$\Delta V \approx U \frac{R_1 \Delta R_2}{(R_1 + R_2)^2} = U \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \frac{\Delta R_2}{R_2} = U \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} k \epsilon, \quad (3)$$

где, как и ранее, k — коэффициент тензочувствительности, а ϵ — относительная деформация.

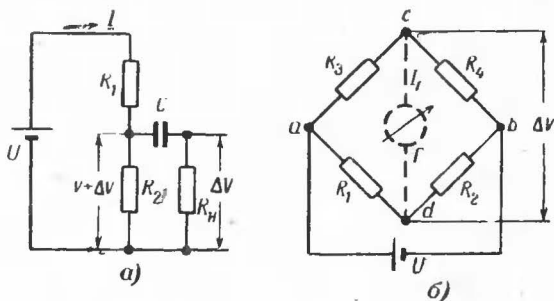


Рис. 6. Схемы включения тензорезисторов.

а — потенциометрическая; б — мостовая.

Таким образом, величина напряжения сигнала ΔV для данного тензорезистора определяется напряжением источника питания U и соотношением между резисторами R_1 и R_2 и в обычных условиях пропорциональна деформации. Максимальная величина U ограничивается допустимым рабочим током тензорезисторов $I_{\text{доп}}$. Что касается величин R_1 и R_2 , то оптимальное соотношение между ними с учетом одновременного увеличения напряжения U и балластного сопротивления R_1 в явном виде не проявляется. Исследованиями П. Штейна установлено, что одновременное увеличение напряжения U и отношения $n = R_1/R_2$ (при условии, что рабочий ток $I_{\text{раб}}$ не превышает $I_{\text{доп}}$) примерно до $n = 5 \div 8$ приводит к увеличению чувствительности схемы. Дальнейшее увеличение n и U нецелесообразно, так как, не давая заметного увеличения чувствительности, оно ведет к ненужному увеличению напряжения источника тока.

В качестве примера определим с помощью тензорезистора 2ПКБ-20-200 величину сигнала при относительной деформации $\epsilon = 0,5 \cdot 10^{-3}$ и напряжении батареи $U = 15$ в.

При $U = 15$ в балластное сопротивление равно:

$$R_1 = \frac{U}{I_{\text{доп}}} - R_2 = \frac{15}{0,03} - 200 = 300 \text{ ом.}$$

Изменение сопротивления ΔR_2 при $\epsilon = 0,5 \cdot 10^{-3}$ согласно (2) составит:

$$\Delta R_2 = R_2 k \epsilon = 200 \cdot 2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} = 0,2 \text{ ом,}$$

тогда

$$\Delta V = 15 \cdot \frac{200 \cdot 300}{(200 + 300)^2} \cdot \frac{0,2}{200} = 3,6 \text{ мВ.}$$

Соответственно чувствительность преобразователя

$$S = \frac{\Delta V}{\epsilon} = \frac{3,6}{0,5 \cdot 10^{-3}} = 7,2 \cdot 10^{-3} \text{ мВ.} \quad (4)$$

В случае, когда активными являются оба резистора и их изменения равны $+\Delta R_1$ и $-\Delta R_2$

$$\Delta V = U \frac{R_1 \Delta R_2 + R_2 \Delta R_1}{(R_1 + R_2)^2 + (R_1 + R_2) (\Delta R_2 - \Delta R_1)}.$$

В частном случае, когда $R_1 = R_2 = R$, а $|\Delta R_1| = |\Delta R_2|$,

$$\Delta V = \frac{U}{2} \frac{\Delta R}{R} = \frac{1}{2} \Delta R.$$

Отсюда максимальная величина сигнала

$$\Delta V_{\text{макс}} = \frac{I_{\text{доп}}}{2} \Delta R = \frac{1}{2} I_{\text{доп}} k R \epsilon. \quad (5)$$

Более совершенной схемой для измерения изменений сопротивления (особенно медленно изменяющихся) является хорошо известная мостовая схема (рис. 6,б).

Для исключения на выходе моста начальной постоянной составляющей последний должен быть уравновешен. Условием равновесия является известное соотношение

$$R_1 R_4 = R_2 R_3. \quad (6)$$

В тензометрии применяются как уравновешенные, так и неуравновешенные мосты. В первых разбаланс моста, вызванный изменением сопротивления тензорезистора, компенсируется известным (калиброванным) изменением сопротивления другого плеча, благодаря чему снова достигается равновесие. Преимуществами уравновешенного моста являются большая точность (ибо результат не зависит от случайного изменения чувствительности нуль-индикатора) и применимость при малых изменениях сопротивления тензорезистора; недостатком — пригодность практически только для статических или медленно изменяющихся процессов, когда за время балансировки моста процесс не изменяется.

Неуравновешенные мосты, в которых изменение сопротивления определяется по величине разбаланса, более универсальны и применимы для измерения как статических, так и динамических процессов.

В неуравновешенных мостах ток через гальванометр I_r (или напряжение в точках cd) находятся в весьма сложной зависимости от всех элементов схемы. Однако если положить, что сопротивление источника питания равно нулю, и рассматривать лишь симметричные схемы, когда

$R_1 = R_2$ и $R_3 = R_4 = nR_1$ — I симметрия;

$R_1 = R_4$ и $R_2 = R_3 = mR_1$ — II симметрия¹

или $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ — полная симметрия, а к диагонали cd подключен усилитель или ламповый вольтметр с большим входным сопротивлением (которое может быть принято $R_i = \infty$), то напряжение сигнала на выходе предварительно сбалансированного моста при одном активном тензорезисторе R_1 будет равно:

$$\Delta V = U \left(\frac{R_1 \pm \Delta R_1}{R_1 \pm \Delta R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right). \quad (7)$$

С учетом I симметрии сигнал будет равен:

$$\Delta V = \frac{U}{2} \frac{\frac{\Delta R_1}{R_1}}{2 + \frac{\Delta R_1}{R_1}},$$

а в случае полной симметрии

$$\Delta V = \frac{U}{4} \frac{\Delta R}{R + 2\Delta R}$$

или (учитывая, что $2\Delta R \ll R$) с погрешностью менее 1%

$$\Delta V = \frac{U}{4} \frac{\Delta R}{R}. \quad (8)$$

В случае если активные тензорезисторы включены в два смежных плеча, причем R_1 при деформации увеличивается, а R_2 уменьшается (схема полумоста) или во все четыре плеча (схема полного моста), то напряжения сигналов на выходе мостов будут соответственно иметь величины

$$\Delta V_2 = \frac{U}{2} \frac{\Delta R}{R} \quad (9)$$

и

$$\Delta V_{(4)} = U \frac{\Delta R}{R}. \quad (10)$$

Определим напряжение на выходе моста в случае нагружения стального стержня, имеющего площадь сечения $F = 10 \text{ см}^2$, силой 2 100 н.

Напряжение в материале стержня $\sigma = \frac{P}{F} = \frac{2 \text{ 100}}{10} = 210 \text{ н/см}^2$.

При модуле упругости $E = 210 \cdot 10^6 \text{ кн/м}^2 = 21 \cdot 10^6 \text{ н/см}^2$ относительная деформация будет:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{210}{21 \cdot 10^6} = 10 \cdot 10^{-6}.$$

¹ II симметрия в промышленных устройствах применяется чрезвычайно редко.

При коэффициенте тензочувствительности $k=2$ относительное изменение сопротивления составит:

$$\frac{\Delta R}{R} = k\varepsilon = 2 \cdot 10 \cdot 10^{-6} = 20 \cdot 10^{-6}.$$

При сопротивлении тензорезистора $R=200$ ом и максимальном токе $I_{\text{макс}}=30$ ма напряжение питания моста должно быть

$$U = 2I_{\text{макс}}R = 2 \cdot 0,03 \cdot 200 = 12 \text{ в.}$$

Напряжение сигнала при одном активном плече

$$V = \frac{U}{4} \frac{\Delta R}{R} = \frac{12}{4} \cdot 20 \cdot 10^{-6} = 60 \text{ мкв,}$$

а при четырех $V = 0,24$ мв.

Все проводившиеся до настоящего момента рассуждения относились к случаю питания моста постоянным током. При питании моста переменным током активные сопротивления в (6) заменяются комплексными сопротивлениями Z , равными $R+jX$, где R — активное сопротивление, а X — реактивное.

Для достижения равновесия моста необходимо выполнение условия

$$Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3, \quad (11)$$

что может быть получено при равенстве действительных и мнимых частей

$$R_1 R_4 - X_1 X_4 = R_2 R_3 - X_2 X_3,$$

$$R_1 X_4 + R_4 X_1 = R_2 X_3 + R_3 X_2. \quad (12)$$

Поэтому равновесие моста может быть достигнуто только при одновременном удовлетворении обоих равенств. Балансировка моста производится путем постепенного многократного приближения — вначале путем уравнивания по реактивной составляющей X , а затем — по активной R . Операция повторяется до получения достижимого минимума тока в диагонали.

Наиболее употребительные схемы уравнивания мостов приведены на рис. 7. На последней схеме рисунка наряду с элементами балансировки показано также сопротивление R_k , с помощью которого осуществляется искусственный калиброванный разбаланс моста, используемый для проверки и регулировки коэффициента усиления усилителя.

Наконец, несколько слов о наклейке тензорезисторов, поскольку работа тензопреобразователя (погрешность, температурный диапазон и т. д.) в большой степени зависит от выбора клея и качества наклейки тензорезистора на упругий элемент.

Перед наклейкой поверхность упругого элемента тщательно очищается напильником и шкуркой от краски и грязи. При этом не следует зашлифовывать поверхность до зеркального блеска, наоборот, для улучшения сцепления полированную поверхность металла в месте установки резистора следует несколько матировать.

После очистки шкуркой поверхность необходимо обезжирить с помощью очищенного бензина (марки Б-70) или четыреххлористого углерода. Дальнейшую очистку производят химически чистым ацетоном и 96%-ным этиловым спиртом до тех пор, пока протирочный материал (вата или марля) не станет совершенно чистым. Заключительная протирка производится этиловым спиртом.

Подготовка поверхностей, растворяющихся в спирте, производится только бензином и четыреххлористым углеродом.

В зависимости от типа тензорезисторов, материала испытуемой конструкции и условий работы применяют те или другие сорта клеев и технологию наклейки и сушки.

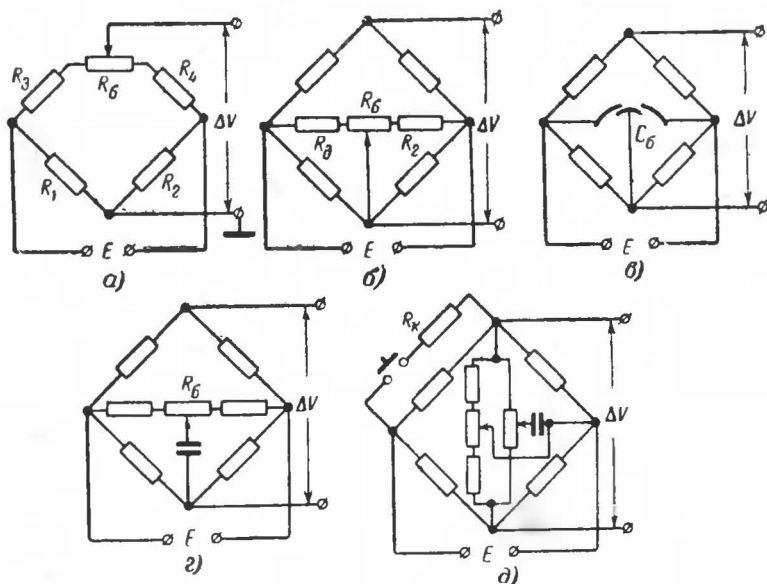


Рис. 7. Схемы уравновешивания мостов.

Наибольшее распространение для наклейки тензорезисторов получили бакелито-фенольные клеи БФ-2 и БФ-4. Из них предпочтительнее следует отдать клею БФ-2, имеющему более широкий интервал рабочих температур (от -60 до $+180^{\circ}\text{C}$) и меньшую ползучесть.

Технология наклейки заключается в следующем.

На подготовленную поверхность наносят первый тонкий слой клея (грунтовку). Одновременно тонкий слой наносят и на обратную сторону тензорезистора и дают клею слегка просохнуть.

Затем на деталь наносят второй слой клея, снова слегка подсушивают и на него накладывают с поджатием через целлофан тензорезистор. Наклеенный тензопреобразователь просушивают в течение 30—40 мин при температуре $50-70^{\circ}\text{C}$. Признаком окончания просушки может служить увеличение сопротивления изоляции между металлической поверхностью и тензорезистором до 25—50 Мом. Если

сопротивление продолжает оставаться низким, сушку следует продолжать.

После подсыхания тензопреобразователь (для уменьшения ползучести клея) рекомендуется нагреть до $120\text{--}140^\circ\text{C}$ и выдержать при этой температуре 1—2 ч для того, чтобы клей полимеризовался. Если деталь велика и не может быть помещена в термостат, то приходится ограничиваться сушкой при нормальных условиях в течение 2—3 суток.

При длительных измерениях статических величин хороший результат показал также клей В-58.

Наклейка полупроводниковых тензорезисторов имеет некоторые особенности. Тензорезистор располагают на детали на клеевом подслое, который образуется после двух-трехкратного нанесения слоя клея БФ-2 с полной полимеризацией с таким расчетом, чтобы толщина клеевого слоя составляла 40—50 мкм.

Перед наклейкой тензорезистор обволакивается пленкой БФ-2 и слегка сушится на воздухе. Затем подготовленную клеевую поверхность детали освежают с помощью тампона, слегка смоченного в спирте, и на нее устанавливают тензорезистор, на который накладывают тефлоновую пленку толщиной 25—30 мкм, прокладку из сукна или фетра и металлическую накладку. Вся стопа поджимается струбиной с давлением $1\text{--}2\text{ кг/см}^2$ и нагревается в термостате при температуре 120°C в течение 2 ч.

После этого для снятия напряжения упругий элемент (если это позволяет конструкция) проходит трехкратный знакопеременный цикл нагрузки до максимальной относительной деформации ($\epsilon = 3 \cdot 10^{-3}$) с выдержкой под нагрузкой и паузой по 20 мин. При этом, если будет отмечаться заметная разница, следует повторить термообработку (при температуре $t = 150 \div 160^\circ\text{C}$) и циклическое нагружение.

Сопротивление изоляции между тензорезистором и металлической поверхностью должно быть не менее 100 Мом. Сопротивление порядка 10 Мом допустимо лишь при измерении быстрых динамических процессов.

При работе в условиях повышенной влажности необходимо принять меры к защите наклеенных тензорезисторов от действия влаги. Повышенная влажность приводит к уменьшению изоляции между решеткой тензорезистора и поверхностью конструкции, а также к ухудшению адгезии клея.

В качестве герметизирующих покрытий могут быть использованы бакелитовые лаки, клей № 88 и др.

Клей № 88 нужно разбавить смесью этилацетата и бензина в пропорции 2 : 1. Тщательно перемешанный клей мягкой кистью наносят тонкими слоями (4—6 слоев) с промежуточной просушкой каждого слоя в течение одного часа. Для упрочнения покрытия просушивают 2—3 дня в нормальных условиях.

2. ЕМКОСТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

В основу работы этого преобразователя положено изменение его емкости при воздействии на него измеряемой величины. Напомним, что емкость плоского конденсатора определяется соотношением

$$C = 0,088 \frac{\epsilon F}{d}, \text{ нф}, \quad (13)$$

где F — действующая площадь обкладок, составляющих конденсатор, см^2 ;

ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость, пф/см (для воздуха $\epsilon=1$);

d — толщина диэлектрика (или зазора), см .

В зависимости от того, на какой параметр воздействует измеряемая величина, емкостный преобразователь может работать с использованием изменения действующей площади F , расстояния между пластинами d или действующей диэлектрической проницаемости ϵ .

Датчики, в которых преобразование измеряемой величины про-

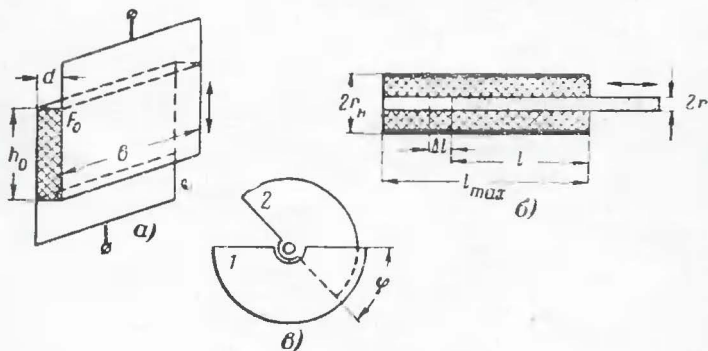


Рис. 8. Емкостные преобразователи с изменяемой площадью.
а — плоский; б — цилиндрический; в — вращающийся.

исходит за счет изменения площади обкладок емкостного преобразователя (рис. 8), наиболее применимы для измерения линейного или углового перемещения.

Если обозначить емкость при отсутствии измеряемой величины через C_0 , а в момент измерения C_1 , то изменение емкости ΔC составит:

$$\Delta C = C_0 - C_1 = 0,088 \frac{\epsilon}{d} \Delta F = 0,088 \frac{\epsilon b}{d} \Delta h. \quad (14)$$

Для увеличения чувствительности преобразователя иногда применяют многопластинчатые конденсаторы, емкость которых определяется зависимостью

$$C = 0,088 \frac{\epsilon F (n-1)}{d}, \quad (15)$$

где F — рабочая площадь пластины, см^2 ;

n — полное число пластин обеих обкладок;

d — расстояние между пластинами, см .

И, соответственно

$$\Delta C = 0,088 (n-1) \frac{\epsilon}{d} \Delta F. \quad (16)$$

Наряду с плоскими конденсаторами для измерения перемещения широко применяются цилиндрические конденсаторы (рис. 8,б) емкость которых определяется зависимостью

$$C = 0,088 \frac{2\pi\epsilon l}{\ln \frac{r_{\text{н}}}{r_{\text{в}}}}, \quad (17)$$

а изменение емкости при смещении на Δl

$$\Delta C = 0,088 \frac{2\pi\epsilon \Delta l}{\ln \frac{r_{\text{н}}}{r_{\text{в}}}}. \quad (18)$$

Таким образом, во всех случаях наблюдается линейная зависимость между изменением емкости ΔC и изменением площади ΔF или перемещением Δh , $\Delta \varphi$ или Δl .

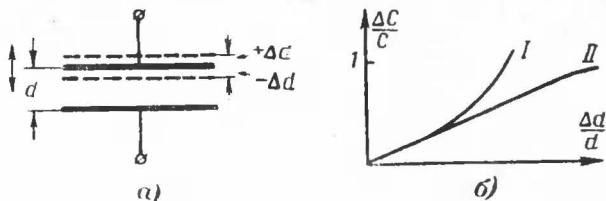


Рис. 9. Преобразователи с переменным зазором.

а — конструкция; б — зависимость $\Delta C/C = f\left(\frac{\Delta d}{d}\right)$.

При измерениях, связанных с вращением или поворотом исследуемого узла, используются преобразователи, подобные переменным конденсаторам. Статор *I* этих конденсаторов (рис. 8,в) обычно жестко закреплен на неподвижной детали, а ротор *2* связан с узлом. Угол поворота которого подлежит измерению.

Вид характеристики такого датчика определяется формулой

$$C = C_0 + 0,088 \frac{\epsilon \varphi \psi}{\alpha}, \quad (19)$$

где C_0 — начальная емкость преобразователя;

φ — угол поворота подвижных пластин относительно неподвижных;

ψ — изменение площади на единицу угла поворота.

Принцип действия преобразователя, в котором измеряемая величина вызывает изменение зазора, показан на рис. 9,а. Принимая те же обозначения, что и в предыдущем варианте, найдем, что абсолютное изменение емкости составит:

$$\Delta C = 0,088 \frac{\epsilon F}{d} \frac{\Delta d}{d \pm \Delta d}, \quad (20)$$

и относительное изменение

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{\Delta d}{d \pm \Delta d}. \quad (21)$$

(В этих уравнениях знак «+» соответствует уменьшению емкости, а «-» — увеличению.)

Зависимость относительного изменения емкости от относительного изменения зазора представлена графически на рис. 9,б. Как видно из графиков, кривая 1, представляющая зазор $d - \Delta d$, с увеличением смещения Δd все круче поднимается вверх и при $\Delta d/d \rightarrow 1$ стремится к ∞ , в то время как в случае уменьшения емкости ($d + \Delta d$) кривая при $\Delta d/d \rightarrow \infty$ приближается к предельному значению $\Delta C/C = 1$.

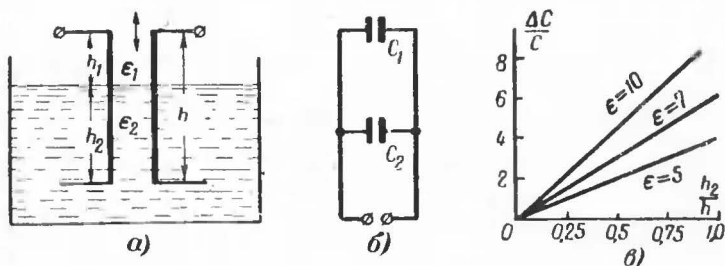


Рис. 10. Преобразователь с переменным диэлектриком.

а — конструкция; б — эквивалентная схема; в — зависимость $\Delta C/C = f(h_2/h)$.

При изменении зазора не более чем на 5% ($\Delta d = \pm 0,05d$) обе кривые имеют примерно линейный характер и относительное изменение емкости практически равно относительному изменению зазора независимо от направления перемещения подвижного электрода.

Преобразователи с изменением диэлектрической проницаемости могут быть осуществлены принципиально в двух вариантах: перемещением диэлектрика перпендикулярно или параллельно плоскости пластин.

В первом случае (рис. 10,а) при различных величинах диэлектрической проницаемости воздуха $\epsilon_1 = \epsilon_v$ и перемещающегося диэлектрика ϵ_2 образуются два параллельно соединенных конденсатора (рис. 10,б), общая емкость которых равна:

$$C = C_1 + C_2 = 0,088 \frac{\epsilon_v b h_1}{d} + 0,088 \frac{\epsilon_2 b h_2}{d}.$$

Учитывая, что $\epsilon_v = 1$, а $h_1 = h - h_2$ и положив $\epsilon_2 = \epsilon$, получим:

$$C = 0,088 \frac{b}{d} (h - h_2 + \epsilon h_2) = 0,088 \frac{b h}{d} + 0,088 \frac{b}{d} (\epsilon h_2 - h_2) = C_v + \Delta C, \quad (22)$$

где

$$\Delta C = 0,088 \frac{bh_2}{d} (\epsilon - 1). \quad (23)$$

Так как чувствительность преобразователя пропорциональна отношению $\Delta C/C$, то можно показать, что она будет пропорциональна диэлектрической проницаемости диэлектрика ϵ , а при данной величине ϵ пропорциональна отношению h_2/h (рис. 10, в).

Преобразователь с диэлектриком, изменяющимся по высоте (d_2) параллельно плоскости электродов (рис. 11), особенно подходит для жидких диэлектриков. Такой преобразователь подобен конденсатору с двухслойным диэлектриком, емкость которого определяется соотношением

$$C = \frac{0,088F}{\frac{d_1}{\epsilon_1} + \frac{d_2}{\epsilon_2}} = \frac{0,088F}{\frac{d - d_2}{\epsilon_1} + \frac{d_2}{\epsilon_2}}. \quad (24)$$

Если принять $\epsilon_1 = \epsilon_v = 1$, $\epsilon_2 = \epsilon$ и разделить числитель и знаменатель на d , то получим:

$$C = C_v + \Delta C,$$

откуда

$$\frac{\Delta C}{C_v} = \frac{\epsilon - 1}{\epsilon \left(\frac{d}{d_2} - 1 \right) + 1}. \quad (25)$$

Из последнего уравнения можно заключить, что при постоянной величине $\epsilon = \text{const}$ изменение емкости будет линейным лишь при малом заполнении пространства между пластинами.

Относительное изменение емкости при измерении неэлектрических величин в зависимости от чувствительного элемента и абсолютной величины емкости колеблется в очень широких пределах ($\Delta C/C = 10^{-6} \div 10$).

Измерение больших изменений емкости относительно не сложно и может быть выполнено самыми разнообразными способами. Для определения малых изменений емкости используются более чувствительные методы: мостовой, резонансный и биеений. Первый из них наиболее простой и может быть применен до $\Delta C/C = 10^{-4} \div 10^{-3}$. Для более чувствительных измерений (до $\Delta C/C = 10^{-5} \div 10^{-6}$) используются второй и третий методы.

Емкостные преобразователи обладают рядом достоинств: высокой чувствительностью, простотой, малыми размерами и весом, малой инерционностью и незначительным обратным воздействием на контролируемый параметр.

Наряду с этим емкостным преобразователям присущи и определенные недостатки: большое внутреннее сопротивление; для достижения высокой чувствительности питание преобразователя приходится производить током высокой частоты, а для уменьшения влия-



Рис. 11. Преобразователь с переменной толщиной диэлектрика.

ния внешних электрических полей и паразитных емкостей необходима тщательная экранировка. Особенно сильное влияние на погрешность преобразователя оказывают изменения температуры и влажности окружающей среды, сказывающиеся на геометрических размерах преобразователя и диэлектрической проницаемости воздуха. Наконец, для достижения максимальной чувствительности монтажные провода должны быть очень короткими, что не всегда удобно.

3. ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Работа пьезоэлектрических преобразователей основана на использовании пьезоэлектрического эффекта, представляющего собой способность некоторых материалов образовывать на гранях поверхности при механическом нагружении электрические заряды (так называемый прямой пьезоэффект), а при приложении электрического поля механически деформироваться (обратный пьезоэффект).

Количественно пьезоэффект оценивается пьезомодулем d , устанавливающим пропорциональность между величиной возникающего заряда Q и приложенной силой P ,

$$Q = dP. \quad (26)$$

Важнейшими природными материалами, обладающими пьезоэлектрическими свойствами, являются кварц и турмалин. Из названных материалов особое предпочтение отдается кварцу, имеющему удовлетворительные пьезоэлектрические свойства, очень высокое сопротивление, относительно малую температурную зависимость пьезо- и изоляционных постоянных, высокую механическую прочность и большой модуль упругости.

Для получения наибольшего пьезомодуля кварцевая шайба, пластинка или диск вырезаются из монокристалла таким образом, чтобы наибольшая плоскость была перпендикулярна кристаллографической оси X (рис. 12). Поэтому ось X называют электрической (или пьезоэлектрической) осью. Обычно у вырезанной прямоугольной пластинки ребро a параллельно оси X , ребро b — оптической оси Z , а ребро l — третьей координатной оси Y , называемой также механической осью.

При нагружении пластины силой P в направлении оси X на ее гранях образуется заряд, равный

$$Q_{np} = d_{11}P_x. \quad (27)$$

Следует отметить, что этот заряд зависит только от приложенной силы и не зависит от геометрических размеров пластины (продольный пьезоэффект).

Если подвергнуть пластину сжатию в направлении оси Y , то на тех же гранях вновь появится заряд, но только противоположного

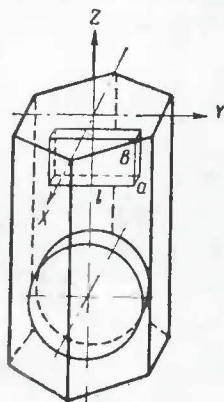


Рис. 12. Ориентация выреза кварцевой пластины.

знака (поперечный пьезоэффект). Величина заряда при поперечном пьезоэффекте оказывается равной

$$Q_{\text{п.пр}} = -d_{11} \frac{l}{a} P_y \quad (28)$$

и, как видно, зависит от отношения l/a . Последнее позволяет путем соответствующего выбора отношения l/a изменять чувствительность преобразователя, предел которой ограничивается механической прочностью пластинок.

При механическом воздействии на пластину в направлении оси Z заряды на электродах не появляются вовсе.

Для увеличения чувствительности преобразователя последний набирают из нескольких (n) пластин, которые механически соединяют последовательно, а электрически — параллельно (рис. 13). В этом случае суммарный заряд Q_{Σ} будет равен:

$$Q_{\Sigma} = nQ, \quad (29)$$

где n — число пластин, а Q — заряд, возникающий на одной пластине.

При практическом использовании обычно измеряют не заряд, а напряжение, развиваемое на емкости, образуемой обкладками пластины,

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{d_{11}P}{C_d}, \quad (30)$$

где C_d — собственная емкость преобразователя.

Для представления о величине напряжения рассмотрим преобразователь в виде кварцевого диска диаметром 10 мм и толщиной 1 мм ($C_d = 3,1 \cdot 10^{-12}$ ф), на который воздействует сила 10 н. Принимая $d_{11} = 2,2 \cdot 10^{-12}$ к/н, в соответствии с (30) получим:

$$U = \frac{2,2 \cdot 10^{-12} \cdot 10}{3,1 \cdot 10^{-12}} = 7,3 \text{ в.}$$

Как указывалось выше, кварц обладает высокой стабильностью параметров. Изменение пьезомодуля от температуры вплоть до 250—300°С практически не наблюдается. Лишь выше 300°С он постепенно

уменьшается, а при температуре $t = 573 \div 576^\circ\text{C}$ пьезоэффект исчезает совершенно. Более значительно влияние температуры на сопротивление кристалла, которое уменьшается с $200 \cdot 10^{14}$ ом/см³ (при $t = 20^\circ\text{C}$) до $8 \cdot 10^{11}$ ом/см³ при $t = 100^\circ\text{C}$.

Другим преимуществом кварца является линейность его характеристики при нагружении вплоть до разрушения.

Второй природный пьезоматериал — турмалин — в отличие от кварца имеет не две пьезочувствительные плоскости, а только одну — оптическую ось Z . Поэтому турмалиновые пластины вырезают так, чтобы их рабочие поверхности были перпендику-

лярны к оптической оси. Благодаря этой особенности турмалин может применяться для измерения гидростатического давления, что делает его труднозаменяемым для измерений давления в жидкости.

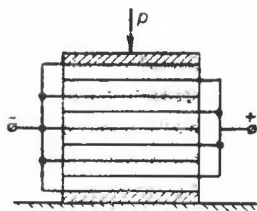


Рис. 13. Схема многоэлементного пьезопреобразователя.

К недостаткам турмалина следует отнести значительно большую по сравнению с кварцем температурную зависимость пьезомодуля. Кроме того, он очень редко встречается в природе и имеет высокую стоимость, что существенно ограничивает его практическое применение.

Наряду с указанными природными кристаллами в технике находят применение и искусственные кристаллы: сегнетовая соль (KNT), дигидрофосфат аммония (АДР), дигидрофосфат калия (КДР) и др.

В отличие от кварца и турмалина пластины из искусственных кристаллов вырезаются под некоторым углом к полярным осям.

Сегнетовая соль имеет очень высокий пьезомодуль (примерно в 150 раз больше пьезомодуля кварца). К сожалению, она имеет низкую механическую прочность, большую зависимость от температуры и влажности.

Другие сегнетоэлектрики (КДР и АДР) имеют более высокую механическую прочность, но вследствие значительной температурной зависимости для измерительных целей применяются редко.

В последние годы широкое распространение получили сегнетоэлектрики в виде пьезокерамик титаната бария и его композиций, ниобатов, цирконата — титаната свинца и др. Все они по сравнению с кварцем имеют большой пьезомодуль, механически прочны, а кроме того, могут быть изготовлены любой формы и размеров.

Та или другая форма (обычно диск, пластина, стержень или цилиндр) обеспечивается соответствующей прессформой. Полученная заготовка металлизируется и поляризуется при соответствующей температуре в электрическом поле.

Исторически первым из пьезоэлектриков был открыт и внедрен в практику измерений титанат бария. К сожалению, наряду с положительными качествами ему присущи и очень серьезные недостатки: изменение пьезомодуля при колебаниях температуры, в процессе хранения, в зависимости от величины приложенной нагрузки, величины шунтирующей емкости и т. д. Так, влияние механического напряжения сказывается в том, что при нагрузке около $8 \cdot 10^7$ н/м² (8 кгс/мм²) пьезомодуль d_{33} начинает существенно снижаться и линейность характеристики $Q=f(P)$ нарушается. Емкость, шунтирующая пьезоэлемент (так называемая масштабная емкость), при величине более $0,1$ мкф также вызывает заметное уменьшение пьезомодуля.

По этим и другим причинам пьезокерамика из чистого титаната бария (ТБ-1) в ответственных измерениях не применяется.

Присадка к титанату бария некоторого количества титаната кальция (двойная композиция типа ТБК-3) или титаната кальция с титанатом свинца (тройная композиция типа БКС) уменьшает температурную и временную зависимости пьезомодуля и диэлектрической проницаемости, однако абсолютные величины их при этом существенно уменьшаются.

Механическая прочность пьезокерамики очень высока, но резко зависит от качества обработки соприкасающихся поверхностей; при наличии прокладки из фольги между пьезоэлементом и плоскостями, передающими давление, временное сопротивление сжатию достигает $(4-6) \cdot 10^5$ кн/м² ($40-60$ кгс/мм²).

Параметры других пьезокерамик на основе ниобата свинца (НБС) и цирконата титаната свинца (ЦТС) более стабильны, чем титанаты бария, однако уступают последним в чувствительности.

Параметр	Кварц	Сегнетова соль		Турмалин	АДР, срез 45°	Титанаты ТБ-1
		срез 45° X	срез 45° Y			
Плотность ρ , г/см ³	2,65	1,77		3,1	1,78	5,3
Относительная диэлектрическая постоянная ϵ	4,5	205	12,0	6,6	14,0	1 500±300
Пьезомодуль d , к/н·10 ¹²	2,2	$d_{14} = 150$ $\frac{d_{14}}{2}$	$d_{25} = 28$ $\frac{d_{25}}{2}$	1,9	$d_{36} = 25$ $\frac{d_{36}}{2}$	$d_{31} = 45$ $d_{33} = 100$
Модуль Юнга E , н/м ² ·10 ⁻¹⁰ . .	7,75	1,84	1,0	16,5	1,9	9—11
Скорость звука c , м/сек	5 720	4 000		7 200	3 300	4 100—4 600
Акустическое сопротивление ρc , г·см ⁻² ·сек ⁻¹ ·10 ⁻⁴	152	71		223	59	220—245
Температура структурного превращения, °С	576	55		—	110	120±10
Максимальная рабочая температура, °С	500	25		—	95	60
Коэффициент линейного расширения α ·10 ⁶	14	—		—	—	15
Прочность на сжатие, кгс/см ²	35 000	120—150		—	250—300	3 000
То же на растяжение	1 000	160		—	250	250
То же на изгиб	1 270	—		—	—	600
Коэффициент электромеханической связи k_p	0,1	0,54	0,3	0,1	0,29	0,20
Удельное объемное электрическое сопротивление при 100° С ρ_v , ом·см						1·10 ⁸

Все перечисленные пьезокерамики имеют в настоящее время широкое распространение и используются для самых разнообразных целей.

Усредненные характеристики пьезоматериалов, имеющих промышленное применение, приведены в сводной табл. 4.

Наряду с преобразователями, в которых пьезоэлемент испытывает сжатие—растяжение, широко распространены конструкции, в которых элемент «работает» на изгиб (рис. 14, а и б) и на сдвиг (рис. 14, в).

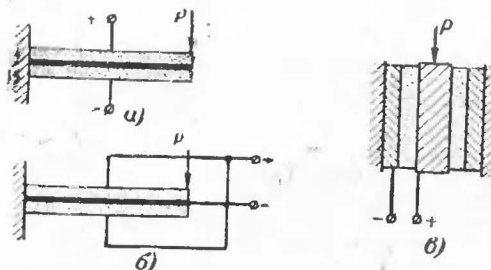


Рис. 14. Конструкции изгибных и сдвиговых пьезопреобразователей.

Таблица 4

бария		Ниобаты свинца		Цирконаты-титанаты свинца		
ТБК-3	БКС	НБС-1	НБС-3	ЦТС-19	ЦТС-21	ЦТС-22
5,3	5,2	5,6	5,5	7,0	7,0	7,0
$1\ 200 \pm 200$	450 ± 50	$1\ 600 \pm 300$	$1\ 800 \pm 400$	$1\ 500 \pm 300$ 350	550 ± 150	800 ± 200
$d_{31}=45$ $d_{33}=85$	$d_{31}=20$ $d_{33}=50$	$d_{31}=65$ $d_{33}=165$	$d_{31}=40$ $d_{33}=100$	$d_{31}=100$ $d_{33}=200$	$d_{31}=25$ $d_{33}=65$	$d_{31}=50$ $d_{33}=100$
11—13	10—12,5	7—9,5	7,5—9,5	5,5—8,5	8,5—9,5	8,5—10
$4\ 500—5\ 000$	$4\ 400—5\ 000$	$3\ 600—4\ 300$	$3\ 700—4\ 200$	$3\ 000—3\ 600$	$3\ 500—3\ 800$	$3\ 600—4\ 000$
240—265	230—260	200—240	200—230	210—250	245—265	250—280
105 ± 10	160 ± 10	265 ± 20	270 ± 20	290	410 ± 10	330 ± 10
—	95	200	200	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—
2 500	3 000	2 000	2 600	3 000	3 000	3 000
—	—	—	—	—	—	—
0,25	0,17	0,28	0,20	0,40	0,20	0,20
$1 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^{10}$	$1 \cdot 10^{11}$	$1 \cdot 10^{10}$	$1 \cdot 10^{11}$	$1 \cdot 10^{11}$	$1 \cdot 10^9$

Пьезоэлемент, работающий на изгиб, состоит из двух одинаковых склеенных между собой балок или пластинок, между которыми находится металлическая прокладка. При изгибе такого элемента одна балка удлиняется, а другая укорачивается. При соответствующей поляризации элементов можно получить либо сумму напряжений (последовательная схема, рис. 14,а), либо сумму зарядов (параллельная схема, рис. 14,б).

Преимуществом преобразователей, работающих на изгиб, является значительно большая чувствительность по сравнению с работающими на сжатие. В то же время изгибные преобразователи значительно уступают последним по прочности и по диапазону частот.

Преобразователь, работающий на сдвиг, изображен на рис. 14,в. Чувствительный элемент этого преобразователя выполнен в виде кольца из пьезокерамики, в которое вклеен внутренний электрод, и само оно помещено во внешний электрод. Под действием силы P происходит деформация сдвига плоскостей, параллельных направлению поляризации. Количественное выражение пьезоэффекта в этом случае оценивается пьезомодулем d_{15} .

Достоинство такого преобразователя заключается в том, что при приложении усилия в плоскости, перпендикулярной оси керамики, заряд на электродах не появляется, вследствие чего существенно уменьшается погрешность измерений из-за влияния боковых составляющих.

Пьезоэлектрические преобразователи пригодны для измерения силы, давления и других измерений, в которых прямо или косвенно проявляются силовые воздействия.

При механическом воздействии на пьезокерамику на ее электродах сообразно с формулой (30) должно возникать то или иное напряжение. Однако в реальных случаях включение преобразователя в схему сопровождается подключением параллельно его собственной емкости C_d других емкостей, образованных емкостью соединительного кабеля C_k и входной емкостью усилителя C_y . Поэтому эквивалентная электрическая схема включения с учетом сопротивления утечки R примет вид, представленный на рис. 15.

Соответственно напряжение, развиваемое преобразователем, оказывается равным

$$U = \frac{Q}{C_{\Sigma}} = \frac{dP}{C_d + C_k + C_y}. \quad (31)$$

Из этого соотношения следует, что для получения максимального напряжения и наибольшей чувствительности следует стремиться

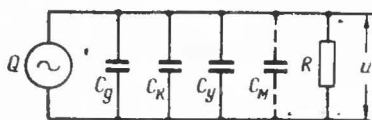


Рис. 15. Эквивалентная схема включения пьезоэлемента.

к тому, чтобы каждая из составляющих суммарной емкости была возможно меньшей. Обычно в случае кварцевых преобразователей $C_d \ll C_k + C_y$, а при использовании преобразователей на базе пьезокерамик емкость преобразователя сравнима с общей емкостью кабеля и усилителя, а часто значительно ее превышает.

Измерение больших усилий нередко связано с появлением на входе усилителя напряжений, намного превышающих динамический диапазон усилителя. В этом случае для уменьшения напряжений, подаваемых на управляющий электрод, параллельно входу усилителя подключают так называемую масштабную емкость C_m (на рис. 15 показана пунктиром).

4. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Термин «электромагнитные преобразователи» объединяет четыре типа преобразователей: индуктивные, трансформаторные, магнитоупругие и индукционные. Для всех этих преобразователей характерно использование зависимости характеристик магнитной цепи (магнитного сопротивления R_m , магнитной проницаемости μ , магнитного потока Φ и др.) от величины механического воздействия на элементы этой цепи.

Индуктивные преобразователи. Индуктивный преобразователь представляет собой дроссель с изменяющимся воздушным зазором (рис. 16,а) или изменяющейся площадью поперечного сечения (рис. 16,б). В качестве выходного параметра в нем выступает изменение индуктивности L (или кажущегося сопротивления Z) обмотки, одетой на сердечник, при изменении величины зазора δ или площади F .

В случае небольшого зазора δ индуктивность дросселя с переменным зазором без учета реактивного сопротивления, обусловлен-

ного потерями на вихревые токи и гистерезис, равна:

$$L = \frac{\omega^2}{R_{\text{ж}} + R_0} = \frac{\omega^2}{\frac{l_{\text{ж}}}{\mu F} + \frac{2\delta}{\mu_0 F_0}}, \quad (32)$$

где ω — число витков обмотки;

$R_{\text{ж}}$, R_0 — соответственно магнитные сопротивления сердечника и зазора;

$l_{\text{ж}}$ — средняя длина магнитной силовой линии в ярме и якоре;

F , F_0 — площади сечений сердечника и воздушного зазора;

μ , μ_0 — магнитные проницаемости материала сердечника и воздушного зазора;

δ — величина зазора.

Когда магнитное сопротивление зазора значительно больше магнитного сопротивления магнитопровода, т. е. $R_0 \gg R_{\text{ж}}$ или $\delta \gg l_{\text{ж}}/2\mu$, выражение (32) принимает вид:

$$L = \frac{\omega^2 F_0 \mu}{2\delta}. \quad (33)$$

Легко заметить, что зависимость индуктивности катушки L от зазора δ существенно нелинейна; удовлетворительная линейность наблюдается лишь при условии, пока $\delta \gg l_{\text{ж}}/\mu_{\text{ж}}$ и $\Delta\delta \ll \delta$.

Полное сопротивление обмотки на частоте ω будет:

$$Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}, \quad (34)$$

где R — активная составляющая сопротивления;

ω — круговая частота переменного тока.

Соответственно величина тока в обмотке равна:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}. \quad (35)$$

Из формул (34) и (35) следует, что относительное изменение Z и I будет тем больше, чем выше добротность катушки ($Q = \omega L/R$).

Индуктивные преобразователи с переменным зазором имеют высокую чувствительность и реагируют на изменение зазора порядка 0,1—0,5 мм. На основании (33) чувствительность преобразователя равна:

$$k_L = \frac{\omega^2 \mu F_0}{2\delta^2}. \quad (36)$$

Диапазон измерений перемещений индуктивными преобразователями с переменным зазором составляет 0,1—1 мм. При большем зазоре зависимость $L = f(\delta)$ становится весьма нелинейной. Поэтому при измерении перемещений до 5—8 мм используют преобразователи с переменной площадью, имеющие большую линейность.

Весьма распространены также индуктивные преобразователи соленоидного типа с разомкнутой магнитной цепью (рис. 16, в). В этих преобразователях изменение индуктивности обмотки вызывается перемещением в катушке ферромагнитного сердечника.

Преимуществом соленоидных преобразователей является возможность измерения больших (до 50—60 мм) перемещений.

Существенным недостатком описанных трех преобразователей является наличие на выходе значительного «нулевого» сигнала. Для компенсации начального сигнала применяются мостовые или дифференциальные схемы (рис. 16, г, д и е), в которых обмотки включаются встречно. Мостовые и дифференциальные схемы имеют более широкий линейный участок статической характеристики, большую чувствительность и меньшую погрешность.

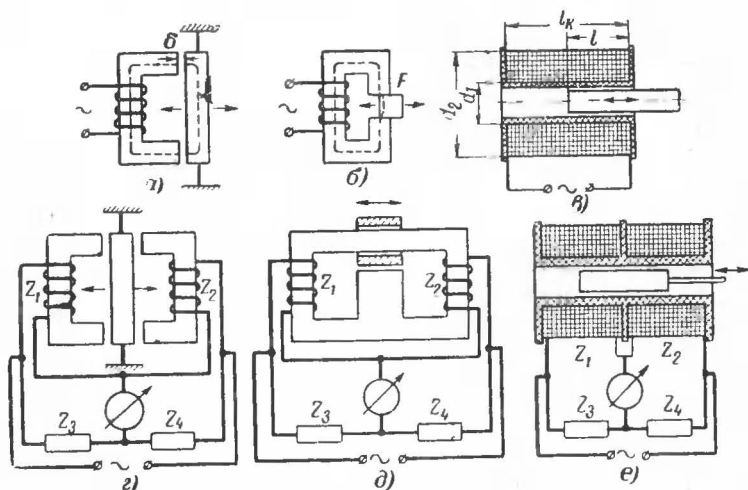


Рис. 16. Конструкции и схемы включения индуктивных преобразователей.

а, г — с переменным зазором; б, д — с переменной площадью; в, е — соленоидного типа.

Трансформаторные преобразователи. В трансформаторных преобразователях используется изменение взаимной индуктивности обмоток преобразователя под воздействием механических перемещений ферромагнитного сердечника. Так, если на магнитный сердечник поместить две обмотки w_1 и w_2 (рис. 17, а, б), то изменение магнитного сопротивления R_m при изменении, например, воздушного зазора приведет к изменению взаимной индуктивности M между обмотками

$$M = \frac{w_1 w_2}{R_m}, \quad (37)$$

а тем самым и к изменению электродвижущей силы e_2 на концах вторичной обмотки w_2 .

Как и в случае индуктивных преобразователей, для компенсации начального тока применяются дифференциальные трансформаторы, у которых вторичные обмотки w'_2 и w''_2 включаются навстречу друг другу (рис. 17, в, г, д).

Недостатком индуктивных и трансформаторных преобразователей является трудность регулировки и компенсации начального напряжения на выходе преобразователя. Кроме того, для уменьшения помех оба типа преобразователей нуждаются в тщательной экранировке, что увеличивает размеры и вес преобразователей.

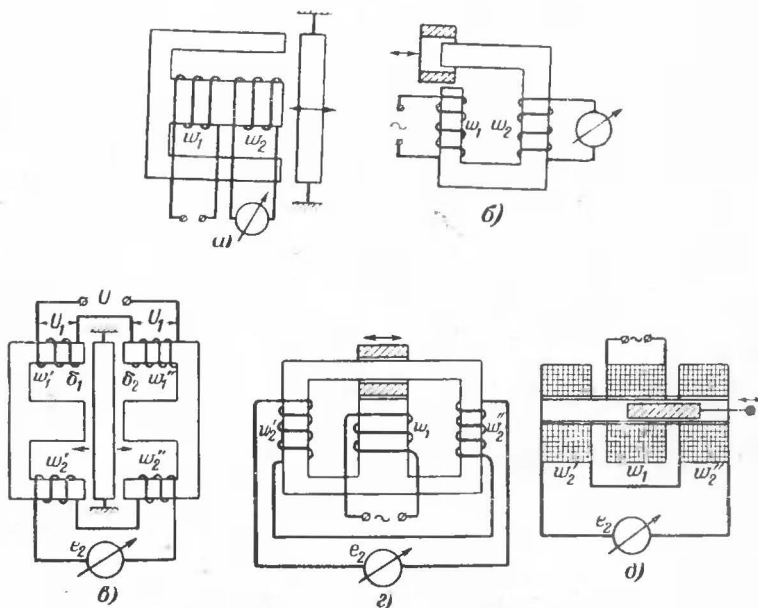


Рис. 17. Конструкции и схемы включения трансформаторных преобразователей.

Погрешности преобразователей вызываются в основном нестабильностью напряжения и частоты источников питания, а также влиянием изменения температуры. При этом следует иметь в виду, что симметричность обеих половин преобразователя уменьшает погрешность, возникающую за счет внешних воздействий.

Достоинствами преобразователей рассмотренных типов являются достаточная мощность без усилительных устройств, высокая чувствительность, сравнительная простота конструкции и эксплуатации, а также невысокая стоимость.

Магнитоупругие преобразователи. Работа магнитоупругих преобразователей основана на изменении магнитной проницаемости μ (или индукции B) ферромагнитных тел под воздействием приложенных к ним механических сил P или напряжений σ (рис. 18).

В общем случае эта зависимость, определяемая также величиной напряженности поля H , имеет довольно нелинейный характер. Однако, выбирая оптимальные режимы, можно получить относительно линейную зависимость $\mu = f(\sigma \text{ или } P)$.

Примерный график изменения относительной магнитной проницаемости ϵ_μ в функции изменения напряжения σ приведен на рис. 19.

Поскольку магнитоупругие преобразователи применяются в основном для измерения сил или напряжений, то в этом случае имеет смысл под чувствительностью преобразователя понимать отношение относительной магнитной проницаемости $\epsilon_\mu = \Delta\mu/\mu$ к механическому напряжению, т. е. величину

$$k_\sigma = \frac{\epsilon_\mu}{\sigma}, \quad (38)$$

выражаемую обычно в процентах на 1 н/мм².

Максимальное значение k_σ для пермаллоя составляет 0,94% (при $H=0,02$ а/мм), для трансформаторной стали — 0,84% (при $H=0,2$ а/мм) и для железа армко — 0,81% (при $H=0,15$ а/мм) при этом все величины напряженности H примерно соответствуют максимуму магнитной проницаемости μ .

В действительности, коэффициент чувствительности значительно меньше, так как рабочая точка H выбирается, исходя из получения наиболее линейной амплитудной характеристики преобразователя. Так, для кривой на рис. 19 эта величина составляет всего 0,11% на 1 н/мм².

При довольно большом разнообразии конструктивных форм, вызванных различными условиями практи-

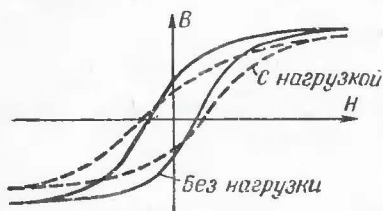


Рис. 18. График изменения проницаемости при сжатии сердечника.

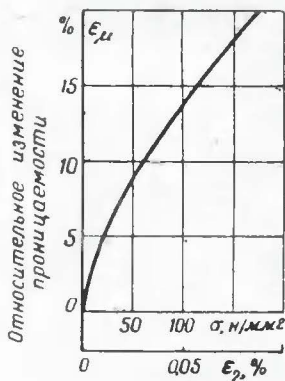


Рис. 19. Зависимость $\epsilon_\mu = f(\sigma)$.

ческого применения, устройства, использующие магнитоупругий эффект, по принципу действия можно разбить на две основные группы: преобразователи дроссельного (рис. 20, а, б) и трансформаторного типов (рис. 20, в—д).

В преобразователях первого типа изменение магнитной проницаемости сердечника приводит к изменению полного электрического сопротивления Z катушки дросселя.

При небольшом поверхностном эффекте относительное изменение сопротивления преобразователя при пренебрежении активным сопротивлением катушки может быть принято равным $\Delta Z/Z = \Delta\mu/\mu$.

Тогда чувствительность преобразователя может быть выражена в виде

$$k_{\sigma} = \frac{\Delta Z/Z}{\sigma}. \quad (39)$$

Электрическая схема включения преобразователя в простейшем случае (рис. 21,а) состоит из последовательно включенных резистора R и дросселя-преобразователя, параллельно которому включен индикатор.

Питание схемы при измерении статических или медленно изменяющихся сил осуществляется обычно от сети переменного тока частотой 50 гц. Иногда для повышения чувствительности преобразователя питание производят током повышенной частоты (до 10 кгц). В последнем случае для уменьшения потерь сердечник делается не сплошным, а набирается из тонких, изолированных друг от друга и тщательно склеенных между собой пластин.

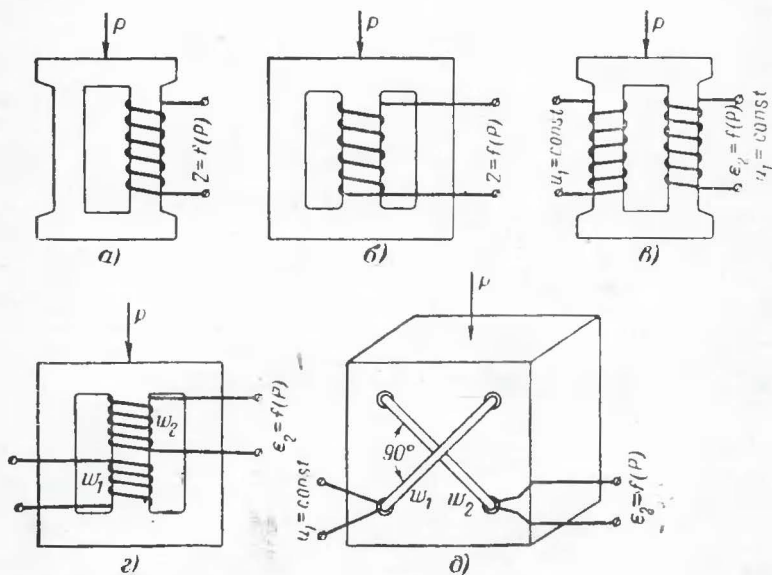


Рис. 20. Конструкции магнитоупругих преобразователей.

Недостатком такой простой схемы является наличие большого начального напряжения U_0 , что сужает динамический диапазон и разрешающую способность измерителя. Поэтому вместо этой схемы обычно применяют дифференциальную — с компенсацией начального напряжения (рис. 21,б). В этой схеме используются две цепи, в которые включены по возможности идентичные элементы: измерительный дроссель $D_{пр}$ и компенсационный дроссель $D_{к}$. При одинаковых параметрах элементов схема будет сбалансирована и ток в измерительной цепи станет равным нулю. По мере нагружения внешней

силой преобразователя его сопротивление уменьшается и на выходе схемы появится ток, пропорциональный нагрузке.

В магнитоупругих преобразователях трансформаторного типа в качестве переменной выходной величины, являющейся функцией приложенной силы, используется взаимная индуктивность. Поэтому такие преобразователи являются по существу трансформаторами с переменным коэффициентом трансформации. Конструктивно магнитоупругие трансформаторы выполняются в виде магнитопроводов различной конфигурации и с различным числом обмоток (рис. 20, в, г, д).

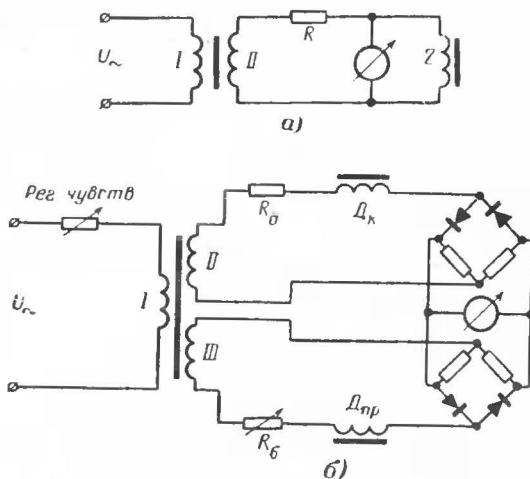


Рис. 21. Схемы включения магнитоупругих преобразователей.

а — последовательная; б — компенсационная.

Особый интерес представляет конструкция, схематически представленная на рис. 20, д. В средней части магнитопровода этого преобразователя, набранного из пластин электротехнической стали, имеются четыре отверстия для размещения обмоток. Отверстия сверлятся таким образом, чтобы плоскости обмоток пересекались под прямым углом и с осями преобразователя составляли угол 45° . Такое расположение обмоток приводит к тому, что при отсутствии внешних механических нагрузок напряжение на выходе преобразователя должно быть равно нулю. Однако из-за неоднородности магнитных свойств магнитопровода и технологических неточностей при изготовлении на выходе всегда будет наблюдаться некоторое напряжение, которое компенсируют магнитным шунтом или дополнительной обмоткой.

Первичная обмотка преобразователей питается от источника переменного тока, частота которого выбирается из условий применения преобразователя: при измерении статических и медленно изменяющихся процессов обычно используется промышленная частота. При измерении динамических процессов частота питающего тока

должна быть в 5—10 раз выше частоты измеряемого процесса. Однако всегда следует иметь в виду, что повышение частоты связано с уменьшением мощности преобразователей из-за влияния поверхностного эффекта и междувитковой емкости. Поэтому для магнитопровода из листового материала увеличивать частоту более 2—3 кГц, а в случае ферритовых сердечников более 100—300 кГц не следует. При измерении быстроизменяющихся воздействий преобразователь может питаться постоянным током. Однако выходное напряжение при этом будет пропорциональным не усилию, а скорости его изменения.

Чувствительность трансформаторного преобразователя в предположении, что относительное изменение э. д. с. вторичной обмотки равно относительному изменению проницаемости, т. е. $\Delta e_2/e_2 = \Delta \mu/\mu$, может быть выражена соотношением

$$k = \frac{\frac{\Delta e_2}{e_2}}{\sigma}. \quad (40)$$

Чувствительность датчиков подобного типа достигает порядка 5—10 мВ/кгс.

Максимальная нагрузка в случае магнитопровода из электро-технической стали не должна превышать $\sigma = (4 \div 5) \cdot 10^7$ н/м² (400—500 кгс/см²).

Основная погрешность при правильном выборе материала и конструкции магнитопровода не превышает 0,5% от величины измеряемого усилия, однако температурная погрешность велика и достигает 1,5—2% на 10° С.

Другим источником погрешности является гистерезис. Погрешность этого вида при статических нагрузках достигает 4%, умень-

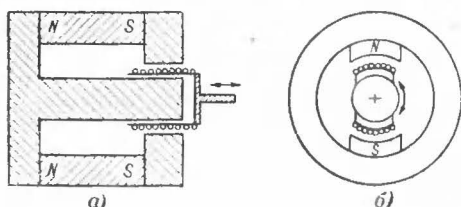


Рис. 22. Конструкции индукционных преобразователей.

а — для измерения поступательного движения;
б — для измерения вращательного движения.

шаясь при динамических нагрузках до 1%. Для уменьшения гистерезисной погрешности сердечник следует изготавливать из ферромагнитных материалов с узкой петлей магнитного гистерезисного цикла и высоким пределом упругости.

Индукционные (магнитоэлектрические) преобразователи В отличие от рассмотренных электромагнитных преобразователей индукционные преобразователи относятся к разряду генераторных преобразователей, так как при воздействии входной величины они способны генерировать электрическую энергию.

В индукционных преобразователях для преобразования механических перемещений в электрический сигнал используется известное явление электромагнитной индукции — наведение э. д. с. в электрическом контуре, в котором меняется величина магнитного потока.

Величина индуцированной в катушке э. д. с. определяется зависимостью

$$e = -w \frac{d\Phi}{dt}, \quad (41)$$

где e — мгновенное значение э. д. с.;

w — число витков катушки;

Φ — величина магнитного потока.

Из приведенного соотношения видно, что наводимая э. д. с. зависит не от абсолютного значения величины магнитного потока, а от скорости его изменения ($d\Phi/dt$) внутри контура. Поэтому индукционные преобразователи могут применяться непосредственно только для измерения скорости перемещений. Для измерения перемещений или ускорений в контур необходимо ввести соответственно интегрирующую или дифференцирующую схему.

Простейшие схемы для преобразования поступательного и вращательного перемещения приведены на рис. 22.

5. ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ (МЕХАНОТРОНЫ)

Электронный преобразователь механических величин в электрический сигнал представляет собой электронную лампу, отдельные электроды которой могут смещаться одни относительно других под воздействием измеряемого внешнего воздействия.

Конструктивно подобные преобразователи могут представлять собой диоды с перемещаемыми анодами, триоды с перемещаемыми анодами или сеткой и т. д. Наиболее простой и распространенной является конструкция в виде диода с перемещаемым анодом. Конструкция механотрона выполняется таким образом, что под воздействием измеряемой величины (смещения или силы) подвижный анод перемещается практически параллельно неподвижному катоду.

При постоянстве тока эмиссии и напряжения между электрода-

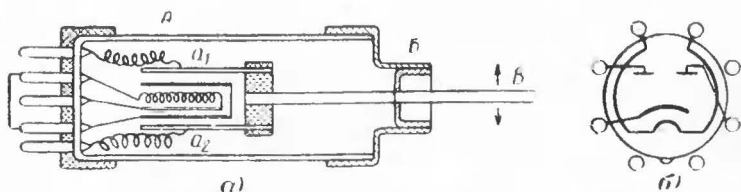


Рис. 23. Электронный преобразователь.

a — конструкция; b — цоколевка.

ми анодный ток механотрона однозначно определяется расстоянием управляемого анода относительно катода: при увеличении расстояния между ними напряженность электрического поля уменьшается, в результате чего соответственно уменьшается и анодный ток; при

приближении анода к катоду анодный ток пропорционально возрастает.

Наряду с обычными параметрами вакуумной лампы механотроны характеризуются еще чувствительностью к перемещению по току ($S_I = \Delta I_a / \Delta l$), по напряжению ($S_V = \Delta U_a / \Delta l$) и чувствительностью к силе ($S_P = \Delta I_a / \Delta P$), которые определяют изменение тока или напряжения к входной величине (Δl или ΔP).

Несмотря на простоту конструкции, диодный механотрон обладает рядом положительных качеств: малым внутренним сопротивлением и значительной чувствительностью по току (до 100 мА на 1 мм смещения анода) при относительно небольшой чувствительности к изменению питающего напряжения.

Для повышения чувствительности схемы в одной лампе обычно монтируют не один, а два анода, жестко связанных между собой и расположенных симметрично относительно катода. В частности, такую конструкцию имеет серийный механотрон типа 6МХ1С, схематическое устройство которого и цоколевка представлены на рис. 23. Как видно из рисунка, механотрон имеет подогревный катод и два подвижных анода a_1 и a_2 , жестко укрепленных на штыре В. Последний проходит через металлическую диафрагму В и может колебаться под воздействием внешней силы.

Механотрон 6МХ1С имеет следующие технические данные:

- напряжение накала — 6,3 в; ток накала — 0,17 а; анодное напряжение — 10 в, ток каждого анода — $7,5 \pm 2,5$ ма;
- номинальный диапазон измерения перемещения — ± 100 мкм;
- номинальный диапазон измерения сил ± 10 гс;
- чувствительность по току к перемещениям — не менее 30 мкА/мкм;
- чувствительность по току к силе — не менее 200 мкА/гс;
- нестабильность (дрейф) выходного сигнала по времени — не более 0,02 мкА/ч;
- чувствительность к изменению температуры — не более 0,05 мкА/°С;
- внутреннее сопротивление $R_i = 1,5$ ком;
- собственное измерительное усилие $P^*_м$ — не более 15 гс;
- вес — 30 г.

На рис. 24 приведена одна из наиболее распространенных схем включения подобного механотрона.

Несмотря на кажущуюся простоту схем и прибора, при работе с механотроном необходимо соблюдать ряд особых условий.

Прежде всего нужно обратить особое внимание на правильность крепления механотрона. Крепление рекомендуется производить за узкую часть фланца В ($13 \pm 0,2$ мм), на которую предварительно следует наклеить эпоксидной смолой жесткое металлическое кольцо. Хотя крепление ламповой панели производится обычным способом,

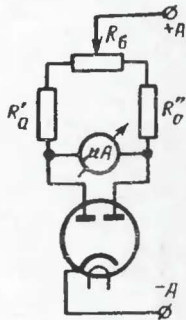


Рис. 24. Схема включения механотрона.

* Собственное измерительное усилие P_m соответствует силе, приложенной к штырю на расстоянии 2 мм от его конца, при которой анодные токи уравниваются.

однако положение ее должно быть ориентировано так, чтобы направление механического воздействия было перпендикулярно плоскости анодов механотрона.

При измерениях механотрон должен быть защищен от прямых потоков теплого или холодного воздуха. Если же точность измерения механотроном должна превышать 1 мкм, необходимо, чтобы колебания температуры не превышали $\pm 1^\circ \text{C}$.

Для обеспечения линейности не хуже 1% выходной характеристики измерительной схемы с механотроном сопротивления анодных нагрузок должны быть в 3—3,5 раза больше внутреннего сопротивления R_i каждой половины лампы.

При особо точных измерениях нестабильность анодного напряжения механотрона не должна превышать 0,1%, а колебания напряжения накала — 1%.

Основное назначение механотрона — прецизионное измерение малых перемещений и сил. Высокая чувствительность механотрона позволяет конструировать на его основе относительно простые электронные измерители с высокой разрешающей способностью. Так, например, микрометр, собранный на механотроне 6MX1C ($S_I = 30 \text{ мка/мкм}$) по схеме на рис. 24 при $R_a = R_i = R_r$ и чувствительности гальванометра $\gamma_r = 1 \text{ мка/дел}$, будет иметь чувствительность

$$\gamma_m = \frac{2\gamma_r}{S_I} = \frac{2 \cdot 10^{-6}}{30 \cdot 10^{-6}} = 0,06 \text{ мкм/дел},$$

где R_i — внутреннее сопротивление механотрона;

R_r — внутреннее сопротивление гальванометра.

Высокая чувствительность схемы позволяет в ряде случаев отказаться от усиления и подключать механотрон непосредственно к электронному или магнитоэлектрическому осциллографу.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ДАТЧИКИ И СХЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

1. КОЛЕБАТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА В КАЧЕСТВЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Известно, что каждый процесс, изменяющийся во времени, может быть представлен некоторым графиком (рис. 25), отражающим изменение регистрируемой величины. Так, изображенный на рис. 25 график может отображать ход изменений силы P , плотности p , скорости v и т. д.

Известно, что всякий сложный периодический процесс путем разложения в ряд Фурье может быть представлен суммой синусоидальных составляющих. Такое представление процесса в виде постоянной и суммы гармонических составляющих дает возможность регистрировать сложный процесс измерительным прибором в виде реакции прибора на каждую из составляющих. Отсюда вытекает, что идеальный измеритель должен одинаково хорошо регистрировать все составляющие — от нулевой до наивысшей частоты с минимальными амплитудными и фазовыми искажениями.

В большинстве случаев регистрация изменяющихся механических величин производится приборами, эквивалентными колебательной системе с одной степенью свободы (рис. 26).

Реакция указанной системы на внешнее воздействие описывается неоднородным линейным дифференциальным уравнением второго порядка

$$x'' + \frac{c}{m} x' + \frac{k}{m} x = -y'', \quad (42)$$

где m — масса колебательной системы;
 c — коэффициент демпфирования;
 k — коэффициент упругости;
 y — измеряемое перемещение.

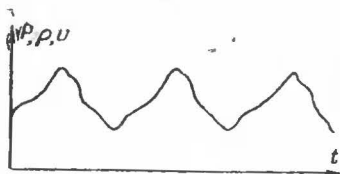


Рис. 25. График периодической функции.

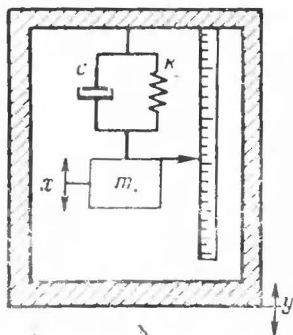


Рис. 26. Колебательная система с одной степенью свободы.

Вводя обозначения $c/m = 2\xi\omega_0$ и $k/m = \omega_0^2$,

где $\xi = \frac{c}{c_{кр}} = \frac{c}{2\sqrt{km}}$ — относительный коэффициент демпфирования;
 $c_{кр}$ — коэффициент критического затухания;
 $\omega_0 = 2\pi f_0$ — угловая частота собственных колебаний системы,

получим:

$$x'' + 2\xi\omega_0 x' + \omega_0^2 x = -y''. \quad (43)$$

Если измеряемая входная величина y изменяется по синусоидальному закону $y = y_0 \sin \omega t$ (где y_0 — амплитуда колебаний основания корпуса, а ω — угловая частота его колебаний), решение уравнения имеет вид:

$$x = e^{-\xi\omega_0 t} [A_1 e^{j\omega_0 t \sqrt{1-\xi^2}} + A_2 e^{-j\omega_0 t \sqrt{1-\xi^2}}] + \frac{\beta^2 y_0}{\sqrt{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2}} \sin(\omega t - \varphi), \quad (44)$$

где $\beta = \omega/\omega_0$ — отношение возбуждающей частоты к собственной частоте системы;

$$\varphi = \arctg \frac{2\xi\beta}{1-\beta^2} \text{ — угол сдвига.} \quad (45)$$

Не раскрывая коэффициенты A_1 и A_2 , определяемые из начальных условий, рассмотрим качественную сторону решения.

Анализ решения показывает, что первый член суммы характеризует собственные колебания, затухающие со временем по экспоненциальному закону. причем скорость затухания определяется коэффициентом демпфирования ξ . По прошествии некоторого времени собственные колебания затухнут и останутся лишь вынужденные, при этом перемещение груза будет происходить по гармоническому закону с частотой ω и амплитудой, зависящей от β и ξ *:

$$x = y_0 \frac{\beta^2}{\sqrt{(1 - \beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2}} \sin(\omega t - \varphi). \quad (46)$$

Из последнего выражения следует, что если β будет иметь большое значение ($\beta \gg 1$), а ξ — достаточно малое ($\xi \ll 1$), то

$$x \approx y_0 \sin \omega t,$$

т. е. перемещение массы будет пропорционально смещению корпуса y_0 .

Если β и ξ будут иметь малые значения, то

$$x \approx y_0 \omega^2 \frac{1}{\omega_0^2} \sin(\omega t - \varphi)$$

и, следовательно, перемещение груза будет пропорционально ускорению корпуса в масштабе $1/\omega_0^2$.

Из этого вытекает, что при возбуждении колебательной системы ниже ее резонансной частоты она будет работать в режиме акселерометра, а выше — в режиме виброметра.

Мы особо обращаем на это внимание, поскольку на этом выводе основана работа названных приборов.

Максимальная величина смещения x из (46) равна:

$$x_{\max} = y_0 \frac{\beta^2}{\sqrt{(1 - \beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2}} = \lambda y_0.$$

Из последнего выражения следует, что максимальное смещение груза определяется затуханием системы и отношением частот, а коэффициент $\lambda = \frac{\beta^2}{\sqrt{(1 - \beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2}}$ может быть назван коэффициентом увеличения. На рисунке 27, а показана зависимость $\lambda = x_{\max}/y_0$ от $\beta = \omega/\omega_0$ при различных ξ .

Как видно из графиков, λ увеличивается при $\omega/\omega_0 = 1$, т. е. при резонансе собственной частоты ω_0 и частоты возбуждения ω .

В отличие от радиотехнических устройств, где наибольший интерес представляет резонансная область, в устройствах для измерения механических величин стремятся уйти от резонанса для того, чтобы частотная характеристика имела вид горизонтальной прямой.

* В случае негармонического процесса реакция системы находится на каждую из составляющих и результаты суммируются.

Из приведенных графиков следует, что наибольшую равномерность частотные характеристики имеют при $\xi=0,6 \div 0,7$ и $\beta > 3$. В этом случае коэффициент $\lambda \approx 1$ и амплитуда смещения груза будет примерно равна смещению корпуса. При $\beta=3$ ошибка составляет не более 2%, при увеличении β ошибка уменьшается и при $\beta=4$ становится менее 0,5%.

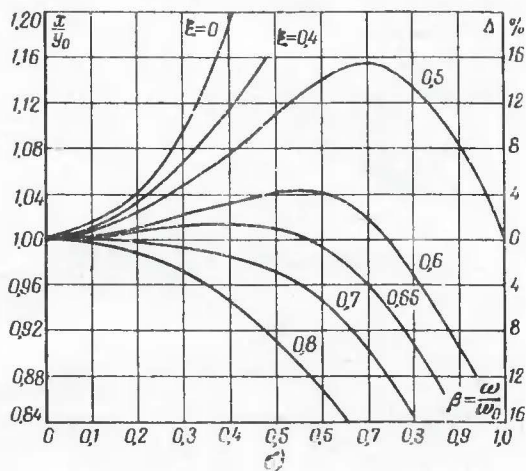
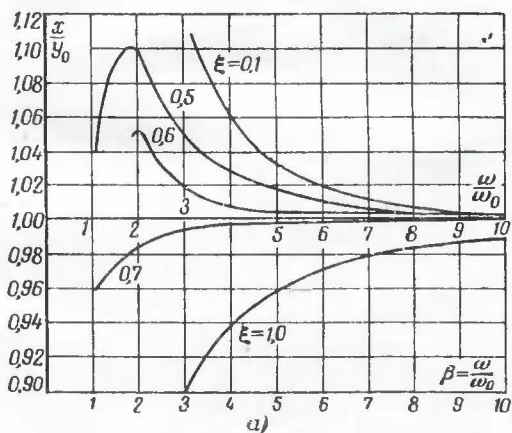


Рис. 27. Графики зависимости смещения от затухания ξ и отношения частот ω/ω_0 .
а — виброметра; б — акселерометра.

Характеристика акселерометра при $\xi=0,7$ будет линейна до частот, пока $\omega < 0,4\omega_0$. При этом амплитудная неравномерность не превышает 0,1%, а при $\omega=0,5\omega_0$ — 2% (рис. 27,б).

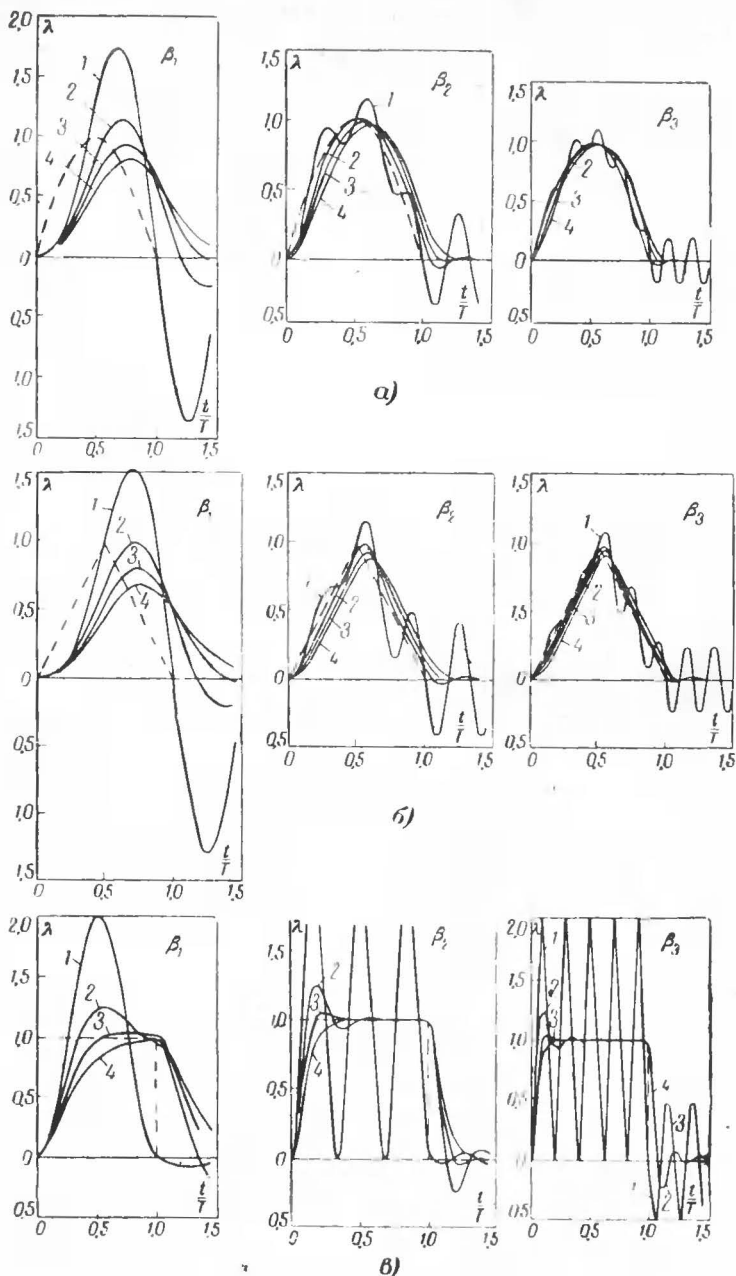


Рис. 28. Кривые реакций акселерометров с различными характеристиками на одиночные ускорения по полусинусоидальному (а), треугольному (б) и прямоугольному (в) импульсам.

Значительно сложнее обстоит дело с определением поведения инерционной массы при исследовании неустановившихся режимов. Практически это удастся лишь в простейших случаях, поскольку даже в случае гармонического возбуждения в течение времени, пока не затухнут собственные колебания, решение получается сложным.

Результаты расчетов реакции акселерометра на три типа возбуждающих импульсов ускорения (полусинусоидального, треугольного и прямоугольного) приведены на рис. 28. Расчеты проведены для трех значений $\beta_1=1,014$; $\beta_2=0,338$ и $\beta_3=0,203$ при коэффициентах демпфирования $\xi_1=0$; $\xi_2=0,4$; $\xi_3=0,7$ и $\xi_4=1,0$ (на графиках входные величины показаны пунктиром, а кривые реакций обозначены цифрами 1, 2, 3 и 4 соответственно коэффициентам демпфирования).

Рассмотрение графиков позволяет получить представление о роли величин β и ξ для регистрации возбуждающих импульсов. Можно заметить, что для треугольного импульса получаются более точные результаты измерения при коэффициенте демпфирования $\xi=0,4$, тогда как для полусинусоидального импульса меньшие ошибки получаются при $\xi=0,7$. Вообще следует сказать, что без учета сдвига фаз наилучшие коэффициенты демпфирования лежат в пределах $0,4-0,7$ от критического значения.

Из рассмотрения графиков можно также заключить, что для измерения процессов, изменяющихся по синусоидальному или треугольному законам с погрешностью менее 5%, необходимо, чтобы период собственных колебаний системы был в 3 раза меньше, чем длительность измеряемого импульса. При измерении тех же процессов недемпфированными системами ($\xi=0$) отношение частот должно

удовлетворять условию $\beta = \frac{\omega}{\omega_0} \leq 0,2$, а для прямоугольных еще меньше.

Из тех же графиков видно, что кривые реакций отстают во времени от начала возмущающего процесса. Действительно, возвращаясь к выражению (44), мы должны отметить в нем наличие угла сдвига фаз φ , определяемого зависимостью (45). Таким образом, наряду с изменением амплитуды будет наблюдаться также сдвиг начала реакции, зависящий от отношения частот ω/ω_0 и затухания ξ .

В более сложных случаях возбуждения системы, например, полигармоническим процессом вида

$$y(t) = \sum_i y_{0i} \sin(\omega_i t + \psi_i),$$

смещение на установившемся участке будет иметь вид:

$$x = \sum_i N_i \sin(\omega_i t + \psi_i + \varphi_i),$$

где

$$N = \frac{y_{0i}}{\sqrt{(\beta_i^2 - 1)^2 + 4\beta_i^2 \xi^2}},$$

а угол сдвига

$$\varphi_i = \arctg \frac{2\beta_i \xi}{1 - \beta_i^2}.$$

Из этих выражений видно, что воспроизведение амплитуды и фазы каждой гармоники будет различным и зависит от затухания и отношения частоты i -й гармоники ω_i к собственной частоте ω_0 .

Зависимость сдвига фазы от частоты называют фазо-частотной характеристикой системы. Ряд таких характеристик при различных

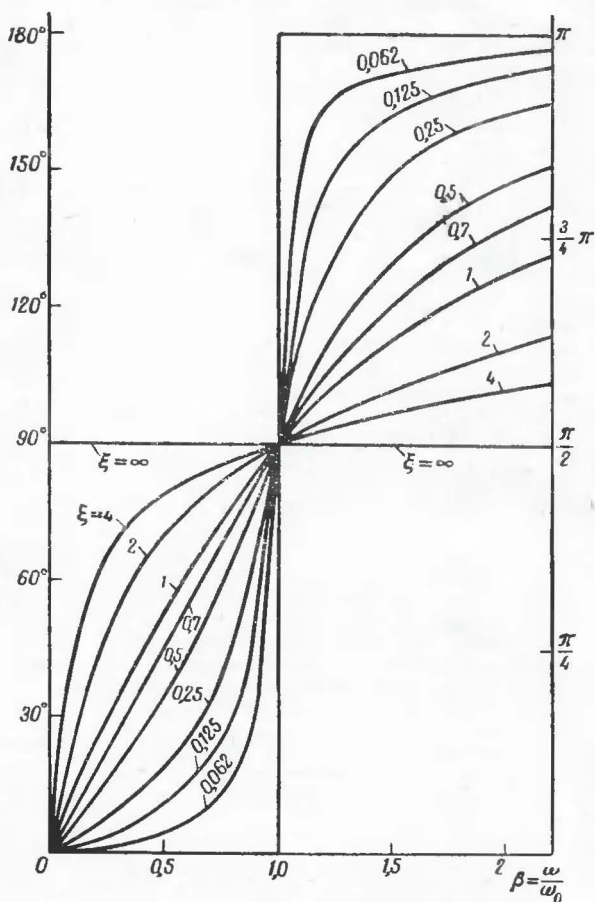


Рис. 29. Фазовые характеристики системы с одной степенью свободы.

значениях затухания представлен на рис. 29. По мере уменьшения силы сопротивления кривые стремятся к предельной, претерпевающей разрыв в точке $\beta = \frac{\omega}{\omega_0} = 1$, т. е. при резонансе. В этой точке,

как видно из выражения (45), для любых значений ξ сдвиг фазы $\varphi = \pi/2$.

Если значение β мало, то при $\omega < \omega_0$ вынужденные колебания почти совпадают по фазе с внешней силой, а при $\omega > \omega_0$ находятся с ней в противофазе.

Если частота ω изменяется постепенно, то фаза вынужденных колебаний меняется в области резонанса ($\beta=1$) на обратную тем резче, чем меньше затухание в системе.

Из сказанного следует, что для правильного измерения процессов, необходимо иметь исчерпывающее представление о параметрах преобразователя: его амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристиках, коэффициенте затухания и величине собственной частоты резонанса.

2. ДАТЧИКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Датчики для измерения перемещения. Для измерения линейного перемещения могут быть использованы все описанные выше типы преобразователей. Выбор конкретного способа преобразования зависит от величины перемещения и имеющихся измерительных средств. Некоторые возможные схемы построения датчиков приведены на рис. 30.

Устройство и работа большинства их не требуют особых пояснений. Следует обратить внимание лишь на наличие в некоторых схемах рычагов, посредством которых осуществляется трансформация величин перемещений. При соответствующем выборе отношений плеч можно получить как уменьшение измеряемого перемещения, так и увеличение. При этом особое внимание следует обратить на люфты в рычажных системах, которые должны быть сведены к минимуму, поскольку они являются источниками погрешностей.

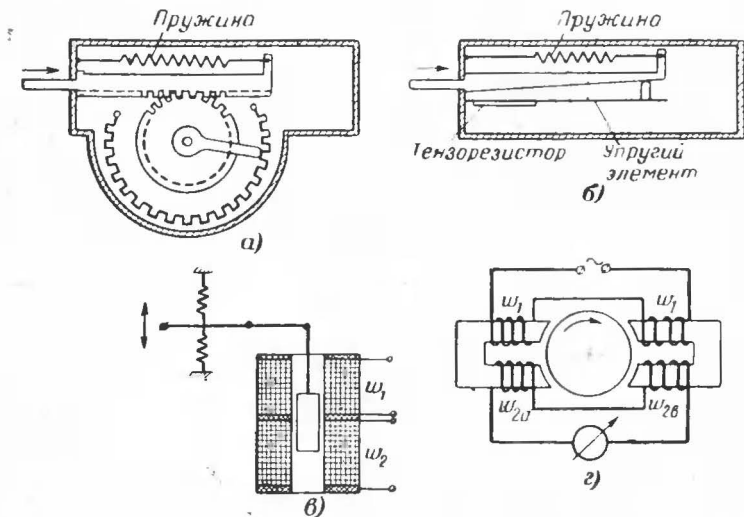


Рис. 30. Конструкции датчиков перемещения.

На рис. 30,г изображена схема датчика бесконтактного измерения радиального перемещения вращающегося вала машины. Катушки w_{2a} и w_{2b} , включенные навстречу друг другу, образуют вторичные обмотки дифференциального трансформатора, а сердечником является вращающийся вал. Смещение вала приводит к изменению воздушного зазора и появлению на обмотках напряжений разной амплитуды.

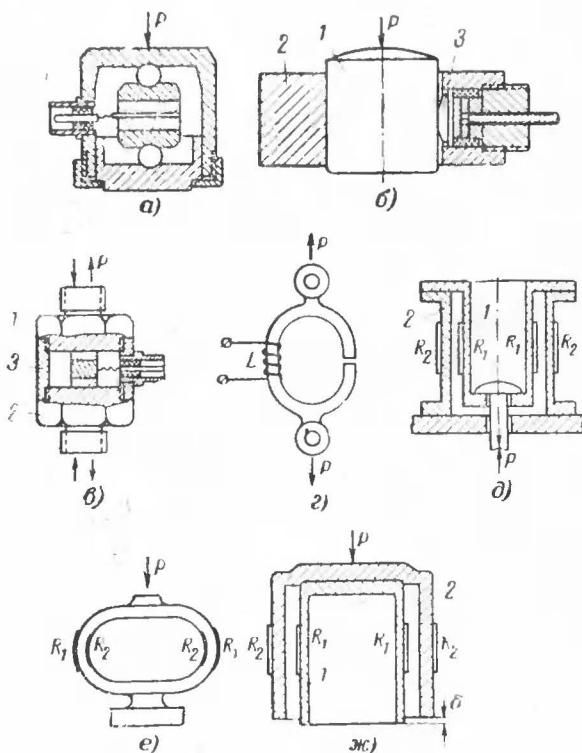


Рис. 31. Конструкции датчиков силы: пьезоэлектрических (а—в), электромагнитного (г), тензоэлектрических (д—ж).

Измерение сосредоточенных сил. Измерение сосредоточенных сил производится либо непосредственно путем прямого воздействия на преобразователь, либо с предварительным преобразованием входной величины в промежуточную, как правило, в перемещение или деформацию упругого элемента.

В первом случае используются магнитоупругие и пьезоэлектрические преобразователи.

Вследствие большой жесткости эти преобразователи имеют высокую собственную частоту резонанса (до 50 кгц и выше) и могут

быть использованы для измерения динамических сил. Однако, в то время, как с помощью магнитоупругих преобразователей могут быть измерены и статические силы, пьезоэлектрические преобразователи практически используются только для переменных сил с минимальной частотой первой гармоники 5—10 гц.

Конструктивное выполнение магнитоупругих преобразователей может быть легко представлено из схем, изображенных на рис. 20. Что касается пьезоэлектрических датчиков, то из большого разнообразия их здесь приводятся лишь три типа конструкций, имеющих определенные особенности.

Отличием первого датчика (рис. 31,а), работающего только на сжатие, является передача усилия через стальные закаленные шарики, с помощью которых достигается равномерное распределение усилия по площади пьезопластины.

Датчик, представленный на рис. 31,б, рассчитан на измерение очень больших сил, непосредственное приложение которых к пьезокристаллам вызвало бы их разрушение. При измерении силы в этом датчике используется увеличение диаметра силового столбика 1 под нагрузкой. Изменение диаметра столбика передается через сферическую пятую 3 пьезопластинкам, смонтированным в стальном закаленном кольце 2.

Третий датчик (рис. 31,в) пригоден для измерения как сжимающих, так и растягивающих сил. Для того чтобы это стало возможным, в преобразователе создается предварительное напряжение сжатия $\sigma_{предв}$, равное примерно половине максимального допустимого напряжения в пьезокристалле. Это напряжение обеспечивается поджатием кристалла верхней и нижней гайками (1 и 2). Максимальное измеряемое таким датчиком усилие не должно превышать того, при котором напряжение в пластинах уменьшается до нуля или увеличивается до предельно допустимого. Абсолютное значение этого усилия зависит от соотношения жесткости пьезоэлемента и корпуса преобразователя 3.

Измерение сил с помощью промежуточного преобразования в смещение или деформацию имеет наибольшее распространение и может производиться с установкой преобразователя как на самой детали, подвергающейся воздействию измеряемой силы, так и с помощью специальных датчиков с упругим элементом в виде балки, стержня, цилиндра, кольца, деформирующимися пропорционально приложенной силе и приходящими в исходное положение при снятии нагрузки. С упругим элементом связаны те или иные преобразующие элементы, на выходе которых продуцируется электрический сигнал. В этом случае могут быть использованы индуктивные, емкостные, тензорезистивные и электронные преобразователи. Некоторые из возможных решений изображены на рис. 31,г—ж.

Измерение деформаций и напряжений в материале. В основу определения напряжений положена известная связь между относительной деформацией ϵ и напряжением σ

$$\sigma = \epsilon E, \quad (47)$$

где $\sigma = P/F$ — напряжение;

E — модуль упругости;

P — сила;

F — площадь сечения;

$\epsilon = \Delta L/L$ — относительная деформация;

L — длина.

В силу ряда преимуществ для измерения напряжений и деформаций наибольшее распространение имеют тензорезисторы сопротивления, поскольку относительная деформация ϵ на длине, равной базе преобразователя, может быть достаточно просто измерена электрическими средствами.

Для определения напряжения при одноосном напряженном состоянии тензорезистор наклеивают на исследуемый элемент в интересующем сечении таким образом, чтобы его продольная ось совпадала с направлением главной деформации (рис. 32, а).

Величина напряжения в этом случае на основании (2), (8) и (47) выразится зависимостью

$$\sigma = E\epsilon = E \frac{\Delta R/R}{k} = E \frac{4\Delta U}{kU}. \quad (48)$$

Измерив напряжение на диагонали моста ΔU (рис. 6, б), можно по известным k , U и E определить напряжение σ .

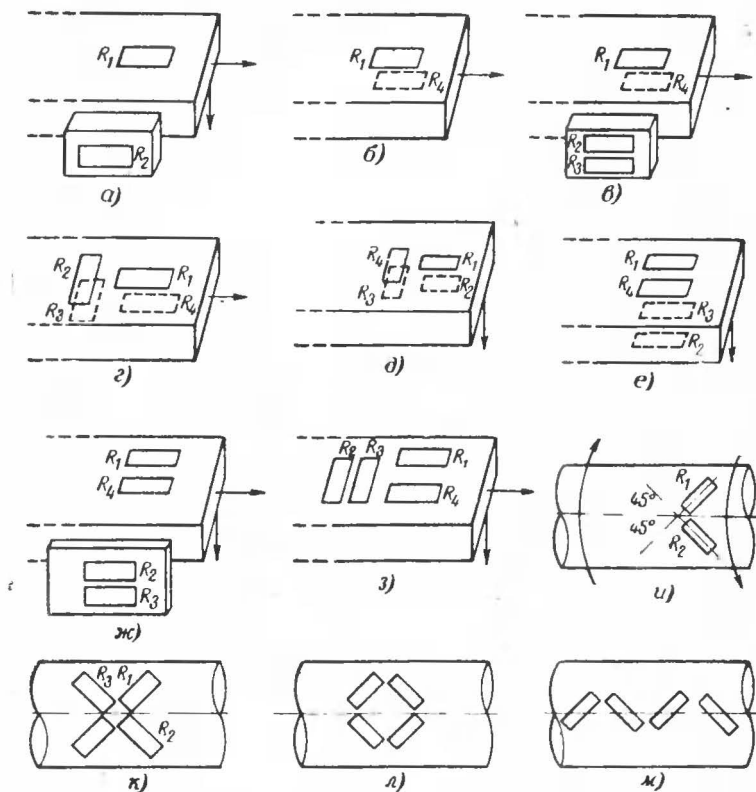


Рис. 32. Схемы наклейки тензорезисторов для измерения деформаций.

а—г — при нормальном нагружении; д, е — при изгибном нагружении; ж, з — при сложном нагружении; и—м — при кручении.

С целью исключения влияния на результат измерения изгибных деформаций на балку наклеивают два активных тензорезистора, включенных по схеме полумоста в два смежных плеча и расположенных симметрично на верхней и нижней сторонах балки (рис. 32,б). Такое включение наряду с увеличением чувствительности в 2 раза обеспечивает также и температурную компенсацию. Величина напряжения в этом случае определяется зависимостью

$$\sigma = 2 \frac{E}{kU} \Delta U. \quad (49)$$

При наличии тензостанции, рассчитанной на включение тензорезисторов по схеме полного моста, могут быть использованы схемы 32,в и г.

В случае схемы на рис. 32,в на балку наклеивают два активных тензорезистора R_1 и R_2 . Два других (компенсационных) тензорезистора R_3 и R_4 наклеены на вспомогательную деталь из того же материала. Напряжение определяется по той же формуле (49), что и для схемы на рис. 32,б.

Пример. Алюминиевый стержень ($E=65 \text{ кн/мм}^2$) диаметром $d=3,5 \text{ см}$ нагружен некоторой силой P . Напряжение на выходе моста, собранного по схеме на рис. 32,б, питаемого напряжением 10 в при сопротивлении тензорезисторов $R=100 \text{ ом}$ и тензочувствительности $k=2$, составляет $\Delta U=2 \text{ мв}$. Тогда напряжение в сечении балки на основании (49) будет равно:

$$\sigma = 2 \frac{65\,000}{2 \cdot 10} \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 13 \text{ н/мм}^2,$$

а приложенная сила

$$P = \sigma F = \sigma \frac{\pi d^2}{4} = 13 \frac{3,14 \cdot 3,5^2}{4} = 11\,480 \text{ н} \approx 11,5 \text{ кн}.$$

При измерении напряжений изгиба используются те же мостовые схемы. Однако расположение тензорезисторов выбирается таким образом, чтобы исключить нормальные напряжения (рис. 32,д, е).

Согласно схеме на рис. 32,д на балку наклеивают четыре тензорезистора, из которых два (R_1 и R_2) являются активными, а два (R_3 и R_4) — пассивными, служащими для компенсации температурного влияния. Легко заметить, что при изгибе балки один активный тензорезистор, например R_1 , регистрируя деформацию растяжения, увеличивает свою величину, а другой (R_2), испытывая сжатие, уменьшает. Включенные в смежные плечи моста они увеличивают чувствительность в 2 раза. С учетом деформации пассивных тензорезисторов сигнал на выходе моста будет:

$$\Delta U = \frac{U}{2} (1 - \mu) k \epsilon_{\text{изг}}. \quad (50)$$

Растягивающие или сжимающие напряжения при таком включении будут компенсированы.

По схеме на рис. 32,е на балку наклеивают четыре тензорезистора. При этом на каждой из сторон балки наклеивают по два активных тензорезистора, включенных в противоположные плечи

моста. При этом сигнал на выходе моста увеличивается в 4 раза и обеспечивается температурная компенсация.

Из курса сопротивления материалов известно, что наибольшие напряжения и деформация при изгибе балки будут у заделки. Поэтому в случае однородной балки для получения наибольшего сигнала тензорезисторы следует размещать вблизи заделки.

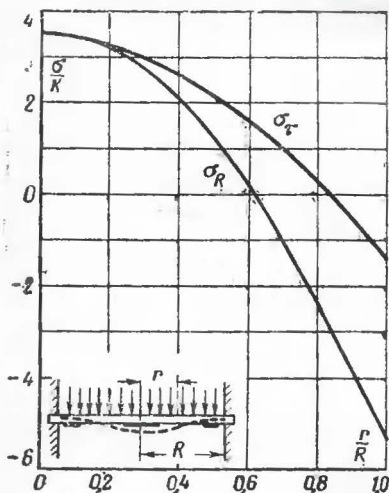


Рис. 33. График изменения напряжений вдоль радиуса мембраны.

ся изгибные и нормальные напряжения с одновременным обеспечением термокомпенсации.

При измерении напряжения кручения τ используется исходное уравнение

$$\tau = G\gamma, \quad (51)$$

где G — модуль сдвига $\left(G = \frac{E}{2(1+\mu)}\right)$;

γ — угол поворота.

Изменение угла γ вызывает пропорциональное изменение линейных размеров волокна наклеенного тензорезистора.

Если исходить из относительной деформации тензорезистора ϵ , наклеенного под углом 45° к оси вала,

$$\epsilon = \frac{\tau}{2G} \quad (52)$$

и формул (2) и (8)–(10), связывающих деформацию с величиной сигнала на выходе моста, то расчетные формулы для определения напряжения кручения примут вид:

$$\tau_{(1)} = 2 \frac{4G}{kU} \Delta U; \quad \tau_{(2)} = 2 \frac{2G}{kU} \Delta U; \quad \tau_{(4)} = 2 \frac{G}{kU} \Delta V \quad (53)$$

Для измерения одновременно действующих нормальных и изгибных напряжений могут быть использованы схемы размещения тензорезисторов, изображенные на рис. 32, ж, з.

Для измерения крутящего момента, приложенного к валу, тензорезисторы наклеиваются вдоль линий, составляющих с осью вала угол 45° (рис. 32, и–м).

На рис. 32, и на вал наклеены два тензорезистора, ориентированные под углом 45° к оси вала. При таком расположении один тензорезистор регистрирует растяжение, а другой — сжатие. Включенные в смежные плечи моста они удваивают сигнал на выходе.

Еще больший сигнал будет получен, если применить схему полного моста (рис. 32, к, л, м), при которой исключают-

соответственно при одном, двух и четырех активных тензорезисторах.

Определение напряжения кручения τ позволяет тут же найти вращающий момент M , поскольку

$$M = \tau W_p, \quad (54)$$

где W_p — полярный момент сопротивления, равный в случае круглого стержня

$$W_p = \frac{\pi d^3}{16}.$$

В качестве примера подсчитаем касательное напряжение τ и вращающий момент M при закручивании алюминиевого стержня диаметром $d=35$ мм, для которого $G=26$ кН/мм², а измеренная деформация волокна составляет $\epsilon=0,5 \cdot 10^{-3}$.

На основании (52) и (54)

$$\tau = 2\epsilon G = 2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 26 = 26 \cdot 10^{-3} \text{ кН/мм}^2 = 260 \text{ МН/мм}^2 \text{ (260 кгс/см}^2\text{)}$$

$$M = \tau W_p = \tau \frac{\pi d^3}{16} = 26 \frac{3,14 \cdot 35^3}{16} = 22 \text{ кН/мм (2,2 кг} \cdot \text{м)}.$$

Измерение давлений. Характерной особенностью многих датчиков давления является применение для преобразования давления в промежуточное перемещение упругих элементов в виде плоских (иногда гофрированных) круглых мембран с отношением толщины к диаметру в пределах 0,1—0,02.

Давление p однозначно (пока частота пульсаций давления значительно меньше частоты собственных колебаний датчика) определяется прогибом мембраны.

Небезынтересно отметить, что механические напряжения на поверхности мембраны, заделанной по контуру, не остаются постоянными, а меняются вдоль радиуса (рис. 33) по законам

$$\sigma_R = -k \left[\left(\frac{3}{\mu} + 1 \right) \frac{r^2}{R^2} - \left(\frac{1}{\mu} + 1 \right) \right] p$$

и

$$\sigma_\tau = k \left[\left(\frac{1}{\mu} + 3 \right) \frac{r^2}{R^2} - \left(\frac{1}{\mu} + 1 \right) \right] p,$$

где $k = \frac{3}{8} \frac{\mu R^2}{\delta^2}$;

μ — коэффициент Пуассона.

Графики функций σ_R/k и σ_τ/k приведены на рис. 33.

Из формул и графика видно, что на некоторых расстояниях от центра $\left(r_R = R \sqrt{\frac{1+\mu}{3+\mu}} \right.$ и $\left. r_\tau = R \sqrt{\frac{1+\mu}{1+3\mu}} \right)$ напряжения σ_R и σ_τ

уменьшаются до нуля, и, изменив знак, снова увеличиваются, достигая у заделки величины

$$\sigma_{R \text{ макс}} = \frac{3}{4} p \left(\frac{R}{\delta} \right)^2. \quad (55)$$

Величины радиальных ϵ_R и окружных ϵ_τ деформаций на внутренней поверхности мембраны определяются зависимостями

$$\epsilon_R = \frac{\delta p}{32D} (R^2 - 3r^2) \text{ и } \epsilon_\tau = \frac{\delta p}{32D} (R^2 - r^2),$$

где $D = \frac{E\delta^3}{12(1-\mu)}$ — цилиндрическая жесткость мембраны, кгс/см.

Преимуществами преобразователей с плоскими мембранами являются простота конструкции и высокие динамические свойства.

Собственная частота заделанной по контуру толстой мембраны определяется по формуле

$$f_0 = \frac{10,2}{2\pi R^2} \sqrt{\frac{D}{m}}, \quad (56)$$

где D — цилиндрическая жесткость;

m — масса единицы площади мембраны, кгс · сек² · см⁻³.

В § 1 этой главы указывалось, что для неискаженного измерения переменного процесса собственную частоту датчика f_0 следует выбрать возможно большей, что, однако, связано с уменьшением

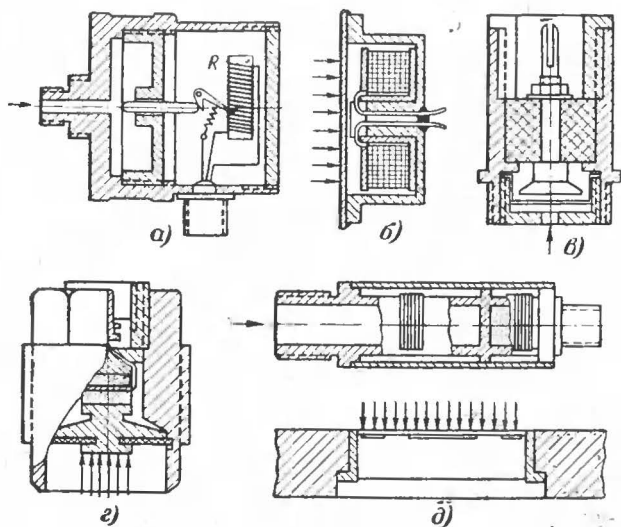


Рис. 34. Датчики для измерения давления.

а — реостатный; б — электромагнитный; в — емкостный; г — пьезоэлектрический; д — тензометрические.

чувствительности. Ввиду сложности расчета оптимального варианта рекомендуется руководствоваться следующим практическим правилом: при одной и той же частоте f_0 лучше брать мембрану меньшего диаметра и меньшей толщины, чем большего диаметра и соответственно более толстую мембрану. При этом период собственных колебаний должен быть равен или несколько менее длительности фронта нарастания процесса.

Следует иметь в виду, что стабильность преобразования давления при помощи мембран тем выше, чем меньше их прогиб; поэтому в качестве преобразователей перемещения в электрическую величину желательно использовать высокочувствительные преобразователи с малым рабочим перемещением, например, емкостные, индуктивные и тензoeлектрические. Материал для мембран должен обладать минимальным гистерезисом, малой зависимостью модуля упругости от температуры, малым коэффициентом теплового расширения и т. д.

На рис. 34 представлено схематическое устройство нескольких датчиков, принцип работы которых не требует особых пояснений. Несколько слов о тензометрических датчиках (рис. 34, д). Для получения максимальной чувствительности тензорезисторы, включаемые по схеме полумоста или моста, должны быть согласно рис. 34 наклеены на мембрану в ее центральной части и на периферии в тех зонах, где напряжения максимальны и имеют противоположный знак. Это положение не следует упускать из виду, поскольку оно накладывает определенные требования к назначению размеров мембран при применении серийных тензорезисторов мембранного типа: диаметр мембраны должен быть лишь не намного больше диаметра тензорезистора. В случае, когда заданный диаметр мембраны не согласуется с диаметром тензорезистора, следует отказаться от мембранных тензорезисторов и применить прямоугольные решетки с различными базами: в центре — резистор с базой, доходящей до $1/3$ диаметра мембраны, а по краям, — не превышающей $1/6$ диаметра.

Особенностью датчика давления, изображенного на рис. 34, д, является то, что активный тензорезистор R_1 наклеен не вдоль по образующей цилиндра, а поперек; компенсационный резистор R_2 наклеен на продолжение цилиндра.

Такая ориентация активного тензорезистора рекомендуется потому, что относительная тангенциальная деформация примерно в два раза превышает продольную ($\epsilon_\tau \approx 2\epsilon_l$) и равна:

$$\epsilon_\tau \approx \frac{1}{3} \frac{D_{\text{ср}}}{\delta E} P, \quad (57)$$

где $D_{\text{ср}}$ — средний диаметр стенки цилиндра.

Диапазон измерений давлений цилиндрическими преобразователями составляет 50—4000 кгс/см², при этом рабочая нагрузка во избежание текучести не должна превышать 0,7 [σ_τ].

При измерении переменных давлений следует учитывать возможность появления резонансных продольных колебаний, частота которых при работе в жидкой среде существенно снижается за счет присоединенной массы жидкости. Кроме того, в случае длинного канала возможно искажение переднего фронта волны давления.

Несколько обособленную группу датчиков давления представляют собой датчики для измерения ударных волн, например, при измерении давлений при взрывах и т. п.

Сложность измерения подобных процессов заключается в том, что в результате резкого изменения давления в обычных датчиках возникают собственные колебания, существенно искажающие реальную картину. Для надежной регистрации таких процессов необходимо, чтобы собственная частота преобразователя была чрезвычайно высокой (порядка 100 000 гц и выше). Последнее может быть реализовано лишь при применении пьезопреобразователей.

Одна из конструкций датчика, предназначенного для измерения давления в проходящей ударной волне, показана на рис. 35,а. Датчик представляет собой заостренный «нож» 2, в корпусе которого установлены два пьезоэлемента 1, которые поджаты легкими мембранами 3.

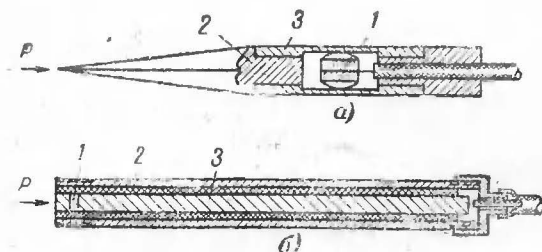


Рис. 35. Датчики для измерения ударных волн.
а — мембранный; б — стержневой.

Несколько другой принцип заложен в датчик, изображенный на рис. 35,б. Этим датчиком удастся регистрировать процессы, длительность которых такого же порядка, что и период собственных колебаний пьезоэлемента. В этом случае пьезоэлемент находится между двумя участками металлического стержня 3. Сам же стержень заключен в металлическую трубку-экран 2, изолированный от стержня парафином и являющийся одновременно вторым электродом.

Сущность принципа заключается в том, что материал стержня подбирается таким, чтобы волна сжатия при своем движении вдоль стержня не имела отражений на границах раздела (стержень — пьезоэлемент и пьезоэлемент — стержень) и в каждом из участков системы не возникали собственные колебания.

В связи с этим напомним, что коэффициент отражения α зависит от характеристик соприкасающихся материалов и определяется выражением

$$\alpha = \frac{E_1 F_1 c_1 - E_2 F_2 c_2}{E_1 F_1 c_1 + E_2 F_2 c_2}. \quad (58)$$

Для того, чтобы отражение при одинаковой площади сечения стержня и пьезоэлемента ($F_1 = F_2$) равнялось нулю ($\alpha = 0$), необходимо, чтобы имело место следующее равенство:

$$\frac{E_{ст}}{c_{ст}} = \frac{E_{п.э}}{c_{п.э}} \quad (59)$$

или, поскольку скорость распространения звука $c = \sqrt{E/\rho}$ (где ρ — плотность материала),

$$\rho_{ст} c_{ст} = \rho_{п.э} c_{п.э} \quad (60)$$

($\rho_{ст}$ — плотность материала стержня; $\rho_{п.э.}$ — плотность материала пьезоэлемента).

При выполнении условий (59) и (60) волна сжатия, вступившая на передний конец стержня, пройдет все участки стержня без отражений и каждый элементарный участок длины такого «однородного» (в акустическом смысле) стержня будет деформироваться пропорционально напряжению, существующему на рассматриваемом участке. В результате этого пьезоэлемент будет вырабатывать заряд, пропорциональный его деформации, вызванной воздействием того участка волны сжатия, который проходит в этот момент пьезоэлемент.

Волна сжатия, дойдя до «заднего» конца стержня, отражается в виде волны разряжения. При этом если измеряемый процесс закончится до прихода отраженной волны, то регистрация волны сжатия будет произведена без искажений, поскольку собственные колебания, возникающие при последующем многократном отражении волн сжатия и разряжения, будут сдвинуты во времени и на осциллограмме могут не учитываться.

Поскольку время прохождения волной сжатия и разгрузки второго участка стержня равно $2l_2/c_{ст}$, то для неискаженной регистрации ударного процесса длину этого участка следует выбирать не менее

$$l_2 = \frac{c_{ст}\tau}{2},$$

где τ — длительность импульса ударной волны.

Из предшествующего следует, что для неискаженной регистрации ударных процессов необходимо прежде всего согласовать волновые акустические сопротивления стержня $\rho_{ст}c_{ст}$ и пьезоэлемента

Таблица 5

Материал	Плотность ρ , г/см ³	Модуль упругости, кн/мм ²		Коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^{-6}$, 1/град	Скорость распространения звука, м/сек		$\rho \cdot 10^4$ г/см ³ сек
		E	G		$c_{ст}$	c_{100}	
Алюминий	2,7	58—72	26	24	5 080	6 260	169
Висмут	9,8	32	12	—	1 790	2 180	214
Вольфрам	19,1	360	134	4,4	4 310	5 460	1 040
Железо	7,8	210	82	12	5 170	5 850	456
Кадмий	8,6	51	19	—	2 400	2 780	240
Латунь	8,4	105	35	19	3 490	4 430	365
Медь	8,9	125	46	17	3 710	4 700	418
Никель	8,9	205	78	13	4 785	5 630	495
Сталь 2—3	7,8	—	—	—	—	5 810	454
Сталь 50	7,8	210	—	15	4 350	4 540	385
Цинк	7,1	105	42	28	3 810	4 170	296
Плексиглас	1,2	5,4	1,5	—	2 550	2 670	32
Полнстирол	1,1	4,3	1,4	6,8	—	2 350	25
Резина	0,9	—	—	—	—	1 480	13,3
Фарфор технический	2,4	58,6	24	4	4 880	5 340	129
Эбонит	1,2	—	—	70	1 570	2 405	29

рп.э.п.э. Справочные данные по этому параметру для некоторых материалов приведены в табл. 5.

В случае применения стержня из материала с отличающимся акустическим свойством его сечение должно быть изменено в соответствии с формулой (58).

Поскольку скорость звука в пьезоэлементе имеет конечное значение, то для неискаженной регистрации фронта сигнала длина пьезоэлемента (высота диска) должна быть не более $l_{п.э} = \tau_{ф}/5c_{п.э}$, в противном случае будет регистрироваться некоторая средняя величина давления за промежуток времени, равный

$$\tau = \frac{l_{п.э}}{c_{п.э}}.$$

Датчики для измерения параметров движения. Диапазон перемещений, скоростей и ускорений, измеряемых в настоящее время электрическими средствами, чрезвычайно широк. Так, величины ускорений простираются от 10^{-6} м/сек² (при движении спутника в космосе) до $500-600 \cdot 10^3$ м/сек² (при соударении стальных закаленных шариков), а скоростей — от 10^{-7} м/сек до космических (8—12 км/сек) и более.

Тесная связь между параметрами движения (перемещением, скоростью и ускорением), определяемая дифференциальными зависимостями, широко используется при построении датчиков, поскольку измерение одного из параметров позволяет путем дифференцирования или интегрирования получить другой. Так, сигнал от датчика ускорения, проинтегрированный дважды по времени, представляется как сигнал перемещения, а дифференцированный сигнал от датчика скорости будет выражать ускорение.

Выбор конкретных средств для измерения параметров движения зависит от характера движения — будет ли оно равномерным, неравномерным или колебательным (вибрационным).

Измерение малых перемещений относительно некоторой опорной точки производится теми же методами, что и измерение линейных или угловых размеров. Для этой цели могут быть использованы все преобразователи, в которых имеется подвижный элемент, в частности реостатные, емкостные, электромагнитные и электронные.

При больших линейных перемещениях, выходящих за пределы измерения преобразователя, измерение производится путем суммирования дискретных перемещений от одной метки до второй, от второй до третьей и т. д. При этом мерная величина может как находиться на неподвижном участке, так и перемещаться. Так, например, путь, пройденный экипажем, суммируется при каждом обороте колеса на длину его окружности. Число же оборотов подсчитывается счетчиком оборотов, например, электроконтактным, индукционным или емкостным.

Определение числа оборотов в единицу времени с помощью тахометра позволяет рассчитать среднюю скорость на этом отрезке пути.

В тех случаях, когда возможность использования опорных (реперных) точек отсутствует, используются датчики сейсмического типа. Подобные датчики находят применение, в частности, там, где при перемещении объекта имеют место инерционные силы.

В соответствии с законом Ньютона эти силы пропорциональны массе m и испытываемому ей ускорению x'' , т. е.

$$F_{ин} = mx''.$$
 (61)

Следовательно, если представляется возможным каким-либо образом измерить силу $F_{ин}$, то при известной массе m могут быть определены и ускорение x'' , а затем скорость x' ($x' = \int x'' dt$) и смещение x ($x = \iint x'' dt dt$). Таким образом, задача измерения параметров движения сводится к задаче измерения силы. Практически измеряется, конечно, не сила, а электрический параметр, являющийся функцией этой силы (например, изменение емкости, сопротивление, э. д. с. и т. д.).

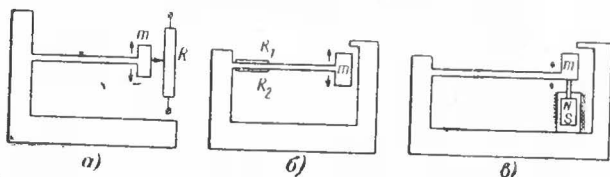


Рис. 36. Инерционные измерители.

а — реостатный; б — тензoeлектрический; в — индукционный.

В случае измерения синусоидальных вибраций задача значительно упрощается, поскольку для полной характеристики процесса достаточно знать его частоту и один из параметров движения (смещение, скорость или ускорение), а для определения остальных параметров процесса используются известные формулы

$$x = A \sin \omega t; \quad x' = A\omega \cos \omega t; \quad x'' = A\omega^2 \sin \omega t. \quad (62)$$

В общем случае такие датчики можно построить с использованием всех упомянутых выше типов преобразователей.

На рис. 36 в качестве примера приведено принципиальное устройство трех типов датчиков с инерционной массой m , укрепленной на упругой балке.

Особенностью первого (реостатного) датчика является то, что инерционная сила $F_{ин}$, возникающая в результате ускорения основания, проявляет себя в виде смещения движка потенциометра, во второй схеме — в виде деформаций балки, а в третьей — в виде скорости перемещения магнита в катушке.

При выборе типа преобразователя необходимо учитывать прежде всего частотный диапазон работы преобразователя. Так, например, применение в акселерометре преобразователя реостатного типа, требующего относительно больших рабочих перемещений, неизбежно приводит к снижению частоты свободных колебаний системы, ограничивая частотный диапазон значениями 10—30 гц.

В отличие от датчиков ускорения, работающих в области частот до резонанса, рабочие частоты датчиков вибросмещений (сейсмических датчиков) обычно находятся в области частот после резонанса. Поэтому для того, чтобы с их помощью можно было регистрировать низкочастотные процессы, необходимо, чтобы датчик имел возможно низкую частоту собственных колебаний.

Как правило, в сейсмических датчиках используются индукционные преобразователи, выходной сигнал которых пропорционален скорости, вследствие чего индукционные сейсмодатчики являются диф-

ференцирующим элементом (поскольку сама колебательная система работает в режиме виброметра). Поэтому для получения сигнала, пропорционального вибросмещению, на выходе датчика необходимо включить интегрирующую цепь.

Наиболее высокочастотными датчиками, пригодными для измерения больших ускорений (в том числе и ударных), являются пьезодатчики. Принципиальные схемы нескольких из них представлены на рис. 37.

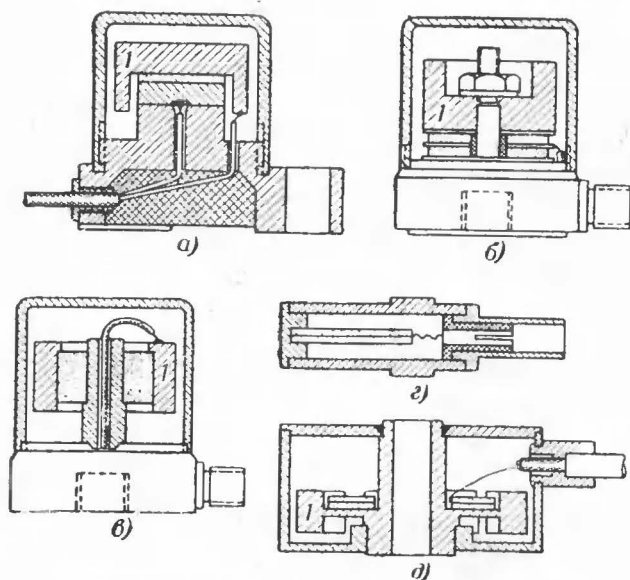


Рис. 37. Пьезоэлектрические датчики ускорений.

а — клеевый; б — с поджатием; в — сдвиговый; г, д — изгибные.

Датчики, представленные на рис. 37, а, б, работают на сжатие — растяжение и отличаются один от другого тем, что в первом инерционный элемент 1 прочно приклеен токопроводящим клеем к пьезоэлементу, а во втором — поджат с предварительным напряжением. Усилие поджатия выбирается с таким расчетом, чтобы даже в случае предельного ускорения оно не уменьшалось до нуля и в цепи не происходило нарушения контакта.

Преимуществом датчика «с поджатием» является то, что в нем удастся достигнуть большей (по сравнению с клеевым) собственную частоту, а недостатком — то, что в силу наличия двусторонней связи с корпусом характеристика датчика определяется уже не только параметрами пьезоэлемента, а и константами материала корпуса.

В третьем датчике пьезоэлемент работает на сдвиг. Достоинством этого датчика является существенное уменьшение по сравнению с первыми боковой (или поперечной) чувствительности.

В датчике, изображенном на рис. 37, г, пьезоэлемент испытывает изгибную деформацию. Достоинством таких преобразователей явля-

ется повышенная чувствительность. К сожалению, механически они недостаточно прочны, и это является их недостатком. Для увеличения прочности в последних конструкциях датчиков пьезокерамические шайбы наклеивают на жесткие металлические основания (рис. 37, д). В этом случае величина прогиба определяется толщиной основания и инерционной массой I , которые назначаются из условия достижения заданной собственной частоты f_0 .

В настоящее время известно огромное число всевозможных датчиков, различных по своему устройству и назначению, которые могут быть классифицированы по различным признакам, важным в том или другом отношении. Описывать их не представляется возможным, да и незачем, поскольку отличия в них в основном конструктивные, а не принципиальные. Наиболее полное собрание описаний приведено в специальных справочниках.

3. ЭЛЕМЕНТЫ И СХЕМЫ УСИЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Электрические сигналы, вырабатываемые датчиками, в большинстве случаев имеют недостаточные напряжение и мощность для того, чтобы их можно было подать непосредственно на измерительное или регистрирующее устройство. Поэтому они должны быть предварительно усилены до необходимой величины.

К сожалению, из-за большого разнообразия процессов (статический, статодинамический или динамический) и диапазона напряжений сигналов и внутренних сопротивлений датчиков ограничиться одним типом усилителя не представляется возможным. Поэтому в практике измерений применяют различные усилители, учитывающие те или другие особенности.

Схемы и приборы для измерения статической деформации. Как указывалось, для измерения деформации в основном применяются тензорезистивные преобразователи, включенные по схеме полумоста или полного моста, в диагональ которого включается измерительное устройство, служащее одновременно индикатором баланса.

Питание моста может производиться как постоянным, так и переменным током. Последнее более предпочтительно, особенно, если усилитель имеет не один, а несколько каскадов.

Поскольку в измерителях статической деформации используются схемы равновесного моста, то баланс моста определяется по минимуму сигнала, а величина относительной деформации определяется по лимбу, связанному с движком реохорда и калиброванному в единицах деформации.

Для повышения чувствительности индикатора в схему добавляется усилитель постоянного или переменного тока (в зависимости от питания моста).

Технические характеристики промышленных измерителей деформации приведены в табл. 6.

Приборы для измерения статических и статодинамических процессов. Значительно сложнее обстоит дело с усилением сигнала, в котором наряду с постоянной компонентой имеется еще значительная динамическая составляющая, уровень которой может достигать (или даже превышать) уровень постоянной составляющей. В этом случае применяют либо усилитель постоянного тока, либо вводят модуляцию.

Одна из схем усилителя постоянного тока, разработанная К. В. Качуриным, приведена на рис. 38. При четырех активных теи-

Параметр	Тип прибора				
	ИСД-3	УИД-Т	ЭИД-8	ИД-61М	ИД-62М
Диапазон измеряемых деформаций, отн.ед.	$1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-5} - 0,1$	$1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-2}$
Цена деления реохорда	$10 \cdot 10^{-6}$	$10 \cdot 10^{-6}$	$10 \cdot 10^{-6}$	$10 \cdot 10^{-6}$	$10 \cdot 10^{-6}$
Сопротивление тензорезистора, ом	50—500	100—1 000	40—400	50—500	50—500
Напряжение питания моста, в	2,5—3	6		2,5	2,5
Частота питающего напряжения, гц	275	3 500	50	1 000	800
Погрешность измерения деформаций	Одно деление шкалы				
Схема включения преобразователя	Полумост	Мост и полумост	Полумост	Полумост	Полумост
Напряжение питания прибора, в	4—4,5	220~	220~	220~	3,7
Размеры, мм	$220 \times 180 \times 100$	$250 \times 155 \times 150$	$250 \times 170 \times 200$	$260 \times 200 \times 170$	$260 \times 200 \times 145$
Вес, кг	2,7	4	7	7,3	4,6

Примечание. Градуировка приборов выполнена применительно к металлическим тензорезисторам, имеющим коэффициент тензочувствительности $k=2$.

резисторах и чувствительном шлейфе (вибраторе МОВ-2 VIII типа) схема показала вполне удовлетворительную работу и проста по конструкции.

Все усилительные каскады собраны на полупроводниковых триодах. С нагрузки последних каскадов (резисторы сопротивлением 80 ом) усиленный сигнал подается на вибратор или миллиамперметр с нулем в середине шкалы (служащий указателем баланса).

Усилители балансируются методом последовательного приближения переменными резисторами $R=820$ ом и $R=47$ ом при очередном нажатии кнопок K_1 и K_2 .

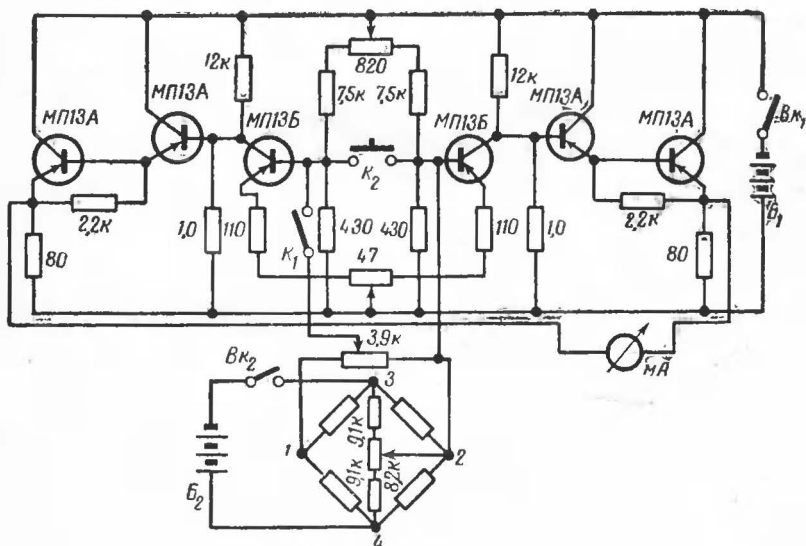


Рис. 38. Принципиальная схема тензометрического усилителя постоянного тока.

При работе с указанным вибратором усилитель имеет следующие характеристики: коэффициент усиления по току — 60 дБ; входное сопротивление — 600 ом; максимальный выходной ток — 4 ма; дрейф нуля за 1 ч не превышает 0,1 ма.

Необходимо иметь в виду, что балансировка и стабильность подобного усилителя существенно зависят от подбора транзисторов: последние должны иметь не только одинаковую величину β , но по возможности и одинаковую зависимость изменения параметров от температуры.

Из-за сложности и нестабильности усилителей постоянного тока (особенно при большом коэффициенте усиления) для усиления статодинамических сигналов используются преимущественно системы с амплитудной модуляцией.

Модуляция сигнала обеспечивается за счет применения для питания моста переменного тока относительно высокой частоты. В этом случае на выходе моста получается переменное напряжение, модулированное по амплитуде измеряемой величиной. Следует отметить,

что такой метод преобразования может быть использован при всех датчиках, имеющих параметрические преобразователи.

Подобно тому, как это делается в радиоприемниках, модулированный сигнал усиливается до необходимого уровня и подается на детектор. Однако в отличие от детектора радиоприемника демодулятор в усилителе должен выделять не только огибающую, но и определять ее полярность (или фазу). Обычно для этой цели используется хорошо известный «кольцевой» демодулятор. Блок-схема такого устройства изображена на рис. 39.

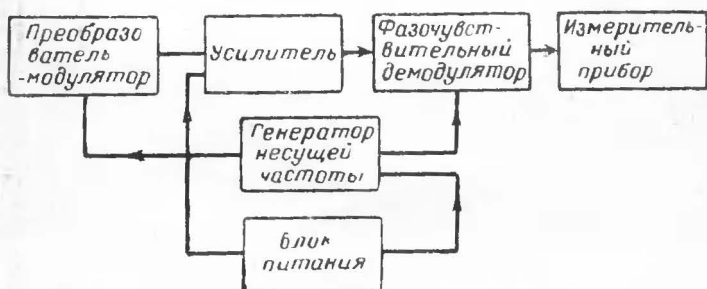


Рис. 39. Блок-схема усилителя с модуляцией сигнала.

Для неискаженного усиления сигнала несущая частота выбирается в 5—8 раз больше верхней составляющей частоты сигнала. Выбирать несущую частоту более высокой не следует, так как при этом резко возрастает влияние кабеля.

В настоящее время по указанной блок-схеме строятся почти все промышленные усилители, рассчитанные для работы с тензопреобразователем (тензостанции) и которые вполне удовлетворительно работают с емкостными или индуктивными преобразователями. Технические характеристики серийных тензоусилителей приведены в табл. 7.

В том случае, когда заранее известно, что исследуемый процесс не содержит постоянной составляющей или она должна быть исключена, целесообразно применять обычные усилители переменного тока с необходимой полосой частот и выходной мощностью.

Усилители для пьезоэлектрических датчиков. Как указывалось выше, для нормальной регистрации пьезодатчиком низкочастотных процессов необходимо, чтобы сопротивление нагрузки преобразователя R имело очень большую величину. В противном случае в передаче сигнала будут наблюдаться амплитудные и фазовые погрешности.

Для оценки возникающей при этом погрешности представим эквивалентную схему входной цепи пьезоусилителя в виде генератора заряда Q , нагруженного параллельно включенной емкостью C (состоящей из емкости пьезодатчика C_d , емкости кабеля C_k , входной емкости усилителя C_y и масштабной емкости C_m) и сопротивлением R , образованным сопротивлением изоляции датчика, кабеля и утечки усилителя (рис. 15).

Таблица 7

Тип станции	Число каналов	Несущая частота, кГц	Диапазон регистрируемых частот, Гц	Максимальный выходной ток, мА	Сопротивление нагрузки, Ом	Сопротивление тензорезисторов, Ом	Схема включения тензорезистора	Максимальное напряжение питания моста, В	Напряжение, В , и мощность питания, Вт	Размеры усилителя и блока питания, мм	Вес, кг
8АНЧ-7М	8	3,5	0—500	30	20—25	70—400	п/мост	7/14	110/220, $P=270$	530×290×280 340×180×170	62
4ТУ-В6-ТД	4	10	0—1 000	40	3,5—6	100	мост	7,5	220~, $P=270$	250×380×250 330×220×280	34
УТС1-ВТ-12	12	35	0—7 000	120	3	100—400	п/мост	8	220~, $P=600$	720×375×280 444×250×334	80
7ДТС-1М	7		0—7 000	200	2	100—250	—	—	220~	870×270×300 460×290×340	88
ПЭТ-3В-М	3	10	0—1 500	150	2,5	200	п/мост	6	220~	380×360×260 400×250×250	45
ТА-4	4	0,5	0—15	—	500	200	п/мост	7,5	27=, $P=3,5$	165×120×230	6
ТА-5	4	7	0—1 000	30	10	100—400		6	110/220, $P=120$	300×225×160 200×150×150	28
ТП-8К	8		0—400	80		270	п/мост		24=, $P=30$	545×295×195	16
УТ4-1	4	15	0—2 000	100	2,5	50—500	мост	9	127/220, $P=160$	362×245×245	16
ИТУ-6	6	50	0—5 000	100		100—250	п/мост	8	110/220, $P=1 500$	600×477×355 570×342×392	145
ТУП-101	10	УПТ	0—6 000	12	18—65	10—800	мост п/мост	5	12=, $P=28$	435×210×135	10,7

Приращение заряда, продуцируемого пьезоэлементом, равно сумме приращения заряда на конденсаторе и утечке его через сопротивление

$$dQ = cdu + idt,$$

откуда

$$\frac{du}{dt} + \frac{1}{RC} u = \frac{1}{C} \cdot \frac{dQ}{dt}.$$

В случае синусоидального возбуждения пьезодатчика $Q = Q_m \sin \omega t$ и уравнение примет вид:

$$\frac{du}{dt} + \frac{1}{RC} u = \frac{\omega Q_m}{C} \sin \omega t.$$

Для установившегося режима решение уравнения получается в виде

$$u = \frac{Q_m}{C} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega RC}\right)^2}} \sin(\omega t - \varphi) = \frac{Q_m}{C} \eta \sin(\omega t - \varphi), \quad (63)$$

где

$$\eta = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega RC}\right)^2}} \approx 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\omega RC}\right)^2 \quad (64)$$

характеризует амплитудную погрешность воспроизведения синусоидального возбуждения, а $\varphi = \arctg \frac{1}{\omega RC}$ — фазовую погрешность.

При величине $\eta \approx 1$ погрешность передачи напряжения δ ($\delta = 1 - \eta$) приближенно может быть подсчитана по формуле

$$\delta \approx \frac{T}{12,5RC}, \quad (65)$$

где T — период колебаний.

Графическое представление зависимости (64) приведено на рис. 40. Из графика видно, что напряжение на входе усилителя при вибрации пьезодатчика с постоянной частотой и амплитудой при уменьшении постоянной времени (за счет уменьшения R) на низких частотах существенно уменьшается.

Амплитудные искажения для некоторых других случаев измерения ускорений, в частности при скачкообразном, линейном и параболическом нарастании, определяются соответственно следующими выражениями:

$$\eta = e^{-\frac{t}{RC}}; \quad \eta \approx 1 - \frac{t}{2RC} \quad \text{и} \quad \eta \approx 1 - \frac{t}{3RC} + \frac{t^2}{12R^2C^2}, \quad (66)$$

где t — длительность наблюдения импульса.

Из последних уравнений следует, что наибольшая погрешность воспроизведения имеет место в области низких частот или при большой длительности импульса t . Величина этой погрешности однозначно определяется постоянной времени RC . Соотношения между по

стоянной времени, длительностью процесса τ и погрешностью для указанных форм импульсов приведены на рис. 40.

Из графика следует, что если задаться для линейно возрастающего импульса амплитудной погрешностью порядка 2%, то постоянная времени входной цепи должна быть не менее $RC \geq 25\tau$. Отсюда в случае импульса длительностью $\tau = 100$ мсек и суммарной емкости $C = 100$ пф эквивалентное сопротивление нагрузки должно быть не менее $R \geq 2,5 \cdot 10^{10}$ ом.

Для получения столь большого сопротивления все применяемые детали и узлы (кабели, разъемы, переключатели) должны быть изготовлены из фторопласта, кварца, радиофарфора или оргстекла, а в качестве масштабных конденсаторов следует применять полистирольные или стирофлексные конденсаторы (К-70, К-71, ПСО). В качестве входной лампы применяют специальные так называемые электрометрические лампы.

Электрометрические лампы в отличие от обычных усилительных ламп, имеющих сеточный ток порядка 10^{-7} а (что соответствует сопротивлению утечки менее 10^7 ом), работают — для уменьшения ударной ионизации — при анодном напряжении не более 20 в, имеют очень хороший вакуум и особо высококачественную изоляцию сетки. Благодаря особым мерам в электрометрических лампах удастся снизить сеточный ток до 10^{-15} — 10^{-13} а.

Номенклатура выпускаемых электрометрических ламп достаточно велика, и экспериментатор может выбрать себе наиболее подходящие. Основные параметры ламп приведены в табл. 8, а цоколевки — на рис. 41.

Схемная часть электрометрических каскадов и режимы их подбираются из условия получения максимального входного сопротивления. Каскады, следующие за электрометрическим, выполняются по обычным усилительным схемам.

До настоящего времени в приборах, предназначенных для регистрации длительных процессов, содержащих постоянную составляющую, применяются как усилители с модуляцией, так и усилители постоянного тока.

Трудность изготовления стабильного усилителя постоянного тока общеизвестна. В случае же, когда усилитель, кроме того, должен иметь мощный выход и работать на низкоомную нагрузку (например, высокочастотный шлейф), эти трудности возрастают во много раз. По этой причине ламповые усилители постоянного тока с выходом «по току» практически не делаются. Несколько проще и надежнее получаются усилители постоянного тока с выходом «по напряжению», рассчитанные на применение электроннолучевой трубки.

В случае применения для регистрации шлейфовых осциллогра-

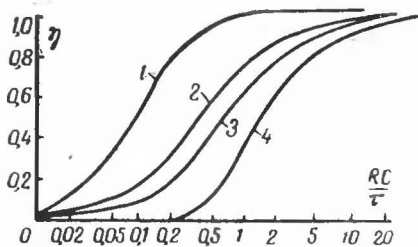


Рис. 40. Зависимость погрешности пьезоусилителя от постоянной времени входной цепи.

(Импульсы: 1 — синусоидальный; 2 — прямоугольный; 3 — пилообразный; 4 — параболический.)

Тип лам- пы	$U_f, \text{в}$	$I_f, \text{ма}$	$U_a, \text{в}$	$I_a, \text{мка}$	$U_{c1}, \text{в}$	$U_{c2}, \text{в}$	$I_{c1}, \text{мка}$	$I_{c2}, \text{а}$	$S, \text{мка/в}$	μ	$C_{с1к}, \text{пф}$	Диаметр и вы- сота, мм
1Э1П	1	46	6	100	4	—3	400	$7 \cdot 10^{-14}$	50	1,3	3,5	19; 62
2ЭП2	2	55	6	45 ± 25	4	—3	750	$8 \cdot 10^{-14}$	22	1,3	4	24; 65
ЭМ4	1,3	24	8	300	—1,7	—	$7 \cdot 10^{-8}$	—	80	2,2	—	19; 66
ЭМ5	3,1	115	5	85	4	—3	450^{+300}_{-150}	$5 \cdot 10^{-15}$	50	1,1	1,6	22; 78
ЭМ6	4,5	75	5	75 ± 45	3,6	—3	425^{+250}_{-150}	$5 \cdot 10^{-15}$	45 ± 25	1,1	1,3	22; 60
ЭМ7	1	18	7	200	—2	—	$5 \cdot 10^{-8}$	—	80	1,6	—	10,2; 43
ЭМ8	6,3	100	15	1800	—2,5	15	$5 \cdot 10^{-5}$	1,3	800	—	4,5	10,2; 43
ЭМ9	6,3	80	7	160	—2	—	$5 \cdot 10^{-7}$	—	110	—	—	10,2; 43

фов для усиления сигнала может быть рекомендован усилитель на транзисторах с питанием от аккумуляторов большой емкости. К сожалению, из-за малого входного сопротивления триодов собрать усилитель целиком на транзисторах не представляется возможным, вследствие чего их делают комбинированными: в первом каскаде используют электрометрическую лампу, а в последующих — транзисторы. Пример такой схемы показан на рис. 42.

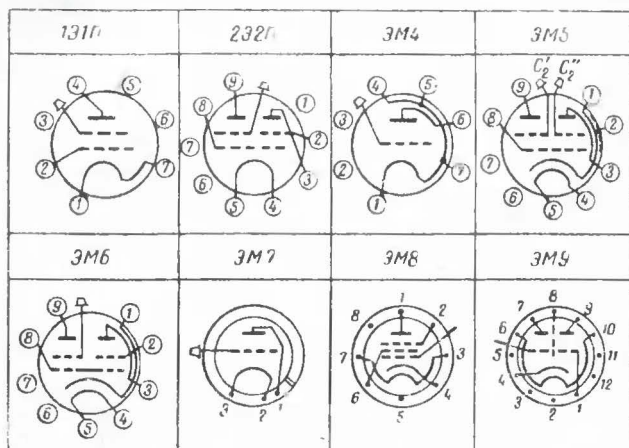


Рис. 41. Цоколевка электрометрических ламп.

При работе пьезоэлектрических преобразователей с усилителем, имеющим высокое входное сопротивление ($R = 10^7 \div 10^{10}$ ом) имеет место, так называемый «кабельный эффект», состоящий в том, что полностью экранированный коаксиальный кабель, присоединенный

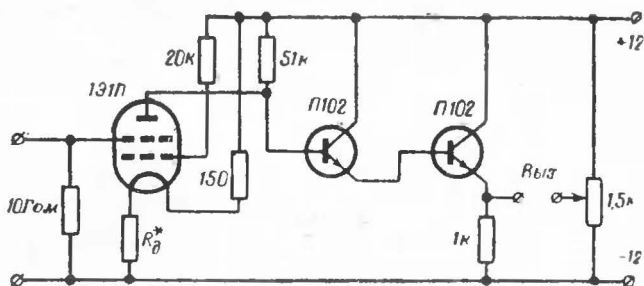


Рис. 42. Принципиальная схема пьезоэлектрического усилителя.

к усилителю и подвергнутый тряске, вследствие электризации трением создает на выходе усилителя в диапазоне частот до 500 гц электрические напряжения, достигающие 30 мв/г. Для уменьшения кабельного эффекта используют специальные графитированные анти-

вибрационные кабели типов АВК-2, АВК-3 и др. У этих кабелей поверхность изоляции, расположенной между внутренней жилой и экранирующей оплеткой кабеля, покрыта слоем графита. Это позволяет снизить уровень помех при вибрации кабеля в 30—40 раз.

В связи с появлением промышленных высококачественных осциллографов, имеющих усилители переменного и постоянного тока (С1-4, С1-18, С1-19 и др.), потребность в разработке усилителей в значительной степени отпала, поскольку в этом случае в качестве основного усилителя может быть использован усилитель осциллографа, а экспериментатору необходимо изготовить лишь катодный повторитель, удовлетворяющий предъявляемым требованиям.

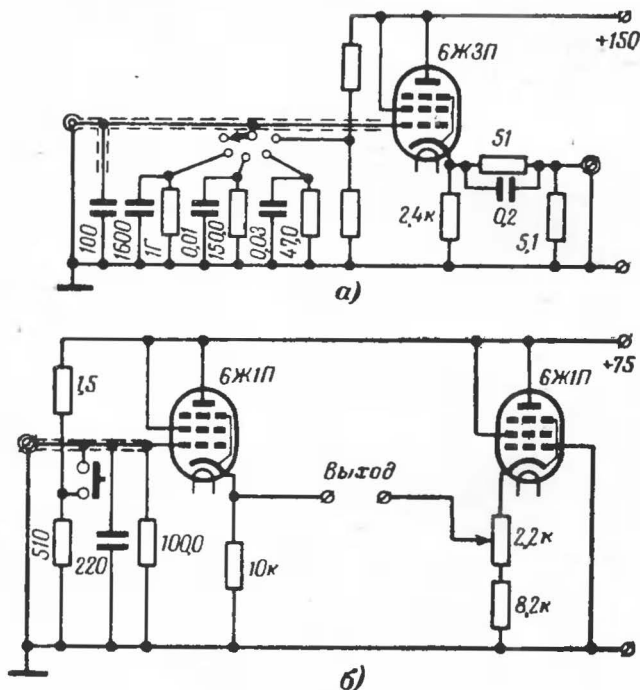


Рис. 43. Принципиальные схемы катодных повторителей.
а — с несимметричным; б — с симметричным выходом.

За неимением специальных электрометрических ламп в катодных повторителях можно применять также некоторые усилительные лампы, имеющие малые сеточные токи, например: 6Ж1П, 6Ж3П, 6Ж1Ж и др. Схемы двух повторителей на этих лампах приведены на рис. 43.

4. УКАЗЫВАЮЩИЕ И РЕГИСТРИРУЮЩИЕ ПРИБОРЫ

При выборе указывающей и регистрирующей аппаратуры не всегда можно однозначно ответить, какое требование является определяющим, они слишком многочисленны и разнообразны: быстродей-

ствие, точность, чувствительность, потребляемая мощность по входной цепи, электрическая и механическая перегрузки, род питания, стоимость.

Разделим все приборы на две основные группы: визуальные указатели и регистраторы. К первой группе относятся приборы со стрелочными, световыми или цифровыми отсчетными устройствами. Такие указатели используются преимущественно для измерения статических или медленно изменяющихся величин.

В качестве указывающих устройств чаще всего применяют стрелочные приборы постоянного и переменного тока, из которых первые имеют ряд преимуществ (по чувствительности, точности, экономичности), из-за чего выходные сигналы обычно представляют в виде изменения постоянного тока. Цифровые указатели, например, цифровые вольтметры ВК-7-5, В7-8, ЦЦ111 и др., целесообразно использовать лишь в тех случаях, когда важно получить особо высокую точность измерений (погрешность измерения такими приборами составляет всего $\pm 0,1-0,2\%$); в других случаях применение столь сложных и дорогих приборов будет нецелесообразно.

Для наблюдения и измерения периодических быстроизменяющихся процессов используются калиброванные электронные осциллографы различных типов.

Для измерения коротких однократных процессов и в тех случаях, когда результаты измерений должны быть сохранены, используют регистраторы — самопишущие измерительные приборы, шлейфовые и электронные осциллографы и магнитографы.

В регистрирующих устройствах запись электрических сигналов, отображающих измеряемую неэлектрическую величину, производится на специальной диаграммной бумаге, фотопленке или осциллографной бумаге.

В зависимости от скорости регистрируемого процесса приборы можно условно разбить на регистраторы с малым и большим быстродействием. Типичными представителями первой группы являются самопишущие амперметры и вольтметры типов Н373, Н375, Н376, Н377 и др. Указанные приборы имеют измерительные механизмы магнитоэлектрической системы, выпускаются на различные диапазоны измерений и производят запись чернилами на диаграммной бумаге шириной 100 мм в криволинейных координатах. Приборы обеспечивают несколько скоростей движения бумаги (от 20 до 5 400 мм/ч) при времени установления показаний порядка 1—2 сек.

Для регистрации более быстрых переменных процессов наибольшее распространение имеют светолучевые (шлейфовые) осциллографы, обладающие универсальностью и быстродействием.

Современные светолучевые осциллографы представляют собой достаточно надежные приборы, пригодные к эксплуатации в самых разнообразных условиях, и с их помощью удастся измерять самые разнообразные величины. Работа с осциллографом требует осторожности и определенных навыков. К сожалению, еще нередко наблюдаются случаи, когда из-за неправильного выбора вибраторов они бывают выведены из строя.

Первая ошибка, как ни странно, наиболее частая заключается в том, что не учитывается допустимый ток $I_{доп}$ через вибратор. Во избежание случайной перегрузки, особенно в процессе подготовки аппаратуры к эксперименту, ток через шлейф необходимо ограничивать шунтом или последовательным (в зависимости от схемы) сопротивлением.

Вторая ошибка, допускаемая при регистрации быстропротекающих процессов, — недостаточный учет частотных характеристик вибраторов. Как правило, это объясняется тем, что экспериментаторы интуитивно стремятся выбрать вибратор как можно более чувствительным, упуская из виду, что гальванометр представляет собой колебательную систему с критическим затуханием, а потому для неискаженной регистрации он должен удовлетворять

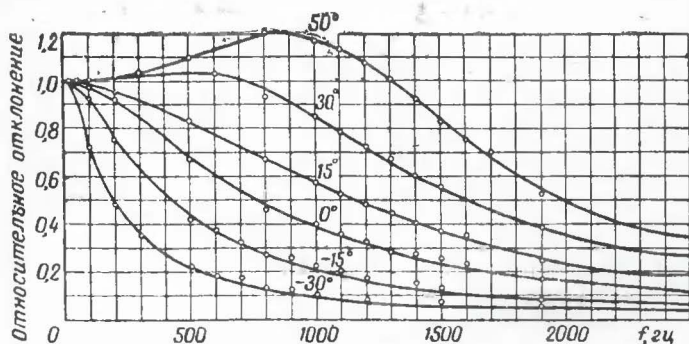


Рис. 44. График температурной зависимости вибратора МОВ-2.

определенным требованиям, о которых говорилось выше. С учетом этого положения нужно выбрать такой тип гальванометра, у которого собственная резонансная частота была бы в 5—10 раз выше частоты основной компоненты процесса.

Третьим упущением является недооценка температурных влияний на характеристики вибратора, особенно когда предварительная калибровка аппаратуры производится в лабораторных условиях, а эксперимент производится в полевых условиях при весьма отличающихся температурных режимах. Насколько большая погрешность может возникнуть при этом легко заключить из графиков, изображенных на рис. 44, где в качестве примера представлены амплитудно-частотные характеристики вибратора МОВ-2 при различных температурах. Для уменьшения температурных погрешностей, связанных с регистрирующей аппаратурой, последнюю необходимо термостатировать, например, так, как это делается в ряде осциллографов (К5-22, К12-22 и др.).

Наряду со светолучевыми осциллографами, имеющими ограниченный частотный диапазон регистрируемых процессов (не выше 3—5 кгц), для измерения быстропротекающих процессов используют электронные осциллографы и результаты измерения фотографируют с экрана электроннолучевой трубки. Такие приборы способны регистрировать механические процессы с частотами до 100 кгц и выше и практически полностью перекрывают частотные диапазоны датчиков всех типов. Некоторым ограничением применимости электрон-

ных осциллографов для регистрации однократных процессов является недостаточная яркость люминофора при большой скорости перемещения луча.

Фотографирование периодических процессов не представляет затруднений, так как при удовлетворительной синхронизации изображение будет устойчивым и достаточно ярким и может экспонироваться столько времени, сколько необходимо для получения фотографии хорошего качества.

В случае однократных процессов время экспонирования определяется скоростью движения луча по экрану. Качество осциллограммы в этом случае определяется яркостью светящегося пятна, светосилой объектива и светочувствительностью фотографического материала.

Выдержка, устанавливаемая на затворе фотокамеры, должна быть выбрана таким образом, чтобы во всех случаях она охватывала измеряемый процесс, но в то же время не была чрезмерно большой, так как при открытом затворе происходит «засвечивание» пленки темновым фоном, в результате чего изображение будет вуалировано.

Наряду с покадровым фотографированием относительно быстрого процесса, развортываемого электрическим способом, нередко применяется осциллографирование процесса с помощью механической развертки на непрерывно движущуюся кинопленку. При этом скорость развертки определяется выбранным масштабом по оси времени для записи процесса, содержащего относительно высокочастотные составляющие. Так, например, если необходимо записать процесс длительностью 20 сек, содержащий составляющие с периодом 0,05 сек, то для того, чтобы иметь возможность рассматривать каждый период более детально, целесообразно «растянуть» осциллограмму так, чтобы каждый период регистрировался не менее чем на 10 мм. Тогда масштаб времени будет:

$$\mu t = \frac{T}{l} = \frac{0,05}{10} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ сек/мм},$$

а скорость движения ленты

$$v = \frac{1}{\mu t} = \frac{1}{5 \cdot 10^{-3}} = 200 \text{ мм/сек}.$$

Общий расход пленки на регистрацию процесса составит:

$$L = vt = 200 \cdot 20 = 4000 \text{ мм} = 4 \text{ м}.$$

Для регистрации однократных быстротекущих процессов широко применяют барабанные камеры, в которых процесс разворачивается на небольшой отрезок пленки L , укрепленной на барабан. При записи барабан приводится в быстрое вращение, причем окружная скорость вращения v может достигать 50 м/сек, что позволяет при масштабе 1 мм/период регистрировать процессы с частотой до 50 кГц. Недостаток этого метода регистрации заключается в ограниченной длине пленки, вследствие чего время съемки равно времени одного оборота барабана $t = L/v$.

Скорость вращения определяется длительностью процесса и масштабом по оси времени.

По установленной скорости вращения v может быть определена «нижняя» частота, которая может быть зарегистрирована при данной длине пленки L . Так, при $L=50$ см и $v=50$ м/сек наименьшая частота равна:

$$f_{\text{н}} = \frac{v}{L} = \frac{5000}{50} = 100 \text{ гц}$$

и, следовательно, более длительные процессы будут сфотографированы лишь частично.

Использование в качестве носителя информации кинопленки связано с определенными недостатками и неудобствами: химической обработкой пленки, потерей времени на обработку и т. д. Поэтому в практике измерений неэлектрических величин все чаще стали применять магнитные регистраторы, которые, не имея указанных недостатков, позволяют вводить результаты измерений непосредственно в вычислительные устройства или анализатор.

К сожалению, такие регистраторы еще не имеют широкого распространения и в книге не рассматриваются.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

КАЛИБРОВКА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

После сборки и всесторонней проверки аппаратуры в условиях, в которых она будет функционировать, ее необходимо калибровать.

Калибровку можно произвести как каждого блока: датчик, усилитель и измерительно-регистрирующий узел отдельно, так и всего тракта в целом. Практически в целях уменьшения объема работ и погрешностей следует всегда (когда это возможно) рекомендовать последнее.

Для калибровки следует применять такие образцовые меры и приборы, которые по своей точности по крайней мере на один или два класса точнее калибруемой аппаратуры.

1. КАЛИБРОВКА ПРИБОРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СИЛ И ДАВЛЕНИЙ

Калибровка приборов для измерения давления в зависимости от характера измеряемой силы осуществляется либо на прессах и разрывных машинах, либо на гидравлических или пневматических установках (при калибровке, например, мембранных датчиков давления).

Основным требованием к установкам, создающим давление, является плавность изменения давления и постоянство установленного давления в процессе считывания показаний.

В качестве контрольных приборов сжатия и растяжения следует пользоваться образцовыми динамометрами III класса типов ДС, ОМ и ДОРМ, которые имеют погрешность, не превышающую $\pm 0,5\%$.

Для создания давления можно использовать образцовые поршневые манометры серии МП (МП-2,5, МП-6, МП-60, МП-600 и

МП-2500), а на большие давления — Н-6000, Н-10000, УВД-15000 и др.

В качестве контрольных индикаторов давления можно применять образцовые манометры серий МО (класса 0,25 и 0,4), ОМН и ОМВ (класса 0,35). В том случае, когда к аппаратуре не предъявляется особо жестких требований по точности, в качестве образцовых манометров могут использоваться контрольные манометры типа МКО (класс 0,5).

Шкалы манометров надо выбирать с таким расчетом, чтобы максимальное рабочее давление при постоянной или плавно меняющейся нагрузке находилось в диапазоне $1/5$ — $2/3$ от предельного значения шкалы, а при резко колеблющейся нагрузке — в пределах $1/3$ — $2/3$ шкалы.

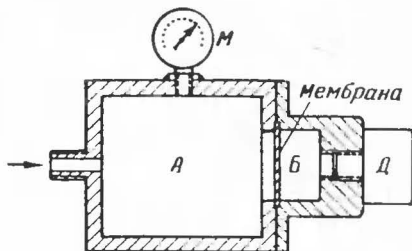


Рис. 45. Конструкция приспособления для динамической калибровки датчиков давления.

Динамическую калибровку датчиков давления можно произвести с помощью приспособления (рис. 45). Калибровка с этим приспособлением основана на резком изменении давления на датчике при разрушении калиброванной чугунной мембраны (крешера).

Калибровка датчика производится следующим образом. В полость А от баллона или компрессора нагнетается сжатый воздух, давление которого измеряется манометром М. При достижении давлением некоторой величины происходит разрыв мембраны и фиксированное давление прилагается к датчику Д, соединенному с полостью Б. Максимальное давление определяется толщиной и диаметром мембраны.

Погрешность измерения зависит от соотношения объемов полостей А и Б — чем меньше объем полости Б (по сравнению с объемом А), тем точнее будет измерено давление на датчике.

2. КАЛИБРОВКА ВИБРОМЕТРОВ И АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

Калибровка инерционных виброметров, велосиметров и акселерометров независимо от принципа их работы имеет много общего и потому может быть рассмотрена совместно.

Из-за отсутствия образцовых датчиков, по которым можно было бы произвести калибровку, как это имеет место, например, при калибровке динамометров, для калибровки акселерометров, велосиметров и виброметров приходится применять так называемые абсолютные методы.

Статическая калибровка. Наиболее простым способом калибровки акселерометров, предназначенных для измерения линейных ускорений в диапазоне от -1 g до $+1\text{ g}$, является использование изменения ускорения силы тяжести посредством изменения угла наклона оси чувствительности акселерометра (рис. 46).

Величина действующего на акселерометр ускорения определяется уравнением

$$a = g \sin \alpha, \quad (67)$$

где α — угол наклона оси чувствительности акселерометра к горизонту.

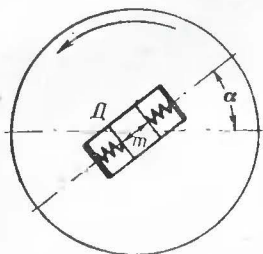


Рис. 46. Схема калибровки акселерометра в поле земного тяготения.

Очень удобным прибором для проведения такой калибровки является оптическая делительная головка типа ОДГ-60, обеспечивающая отсчет угла с точностью до 1'.

Недостатками этого метода являются ограниченный диапазон изменения ускорений и нелинейная зависимость ускорения от угла поворота.

Большие величины линейных ускорений могут быть получены на центрифуге.

При калибровке на центрифуге используются возникающие при вращении центробежные ускорения, величина которых может быть определена по угловой скорости ω и радиусу вращения R

$$a = \omega^2 R = 4\pi^2 n^2 R = \frac{4\pi^2 R}{T^2}, \quad (68)$$

где n — число оборотов в 1 сек;

R — расстояние от оси вращения до центра инерции приведенной массы чувствительного элемента калибруемого акселерометра;

T — период одного оборота, сек.

Погрешность калибровки на центрифуге определяется ошибками измерений периода оборота T (или числа оборотов n) и расстояния R .

Динамическая калибровка необходима в тех случаях, когда приборы используются для измерения вибрационных и ударных процессов и их конструкция не позволяет производить градуировку в статическом режиме.

При динамической градуировке используются установившиеся синусоидальные изменения входной величины (смещения, скорости и ускорения) во времени либо создаются одиночные импульсы, при которых входная величина изменяется по некоторому простому (с математической точки зрения) закону.

В первом случае калибровка осуществляется на вибростендах с малыми нелинейными искажениями, во втором — на баллистических маятниках и падающих молотах. Большим преимуществом градуировки на вибростендах является относительная простота определения частотных характеристик прибора — вибросмещения, виброскорости и виброускорения.

Основные требования, предъявляемые к калибровочным установкам, заключаются в обеспечении чисто гармонического закона колебаний вибростола и малого уровня боковых (поперечных) составляющих колебаний.

Основные зависимости при калибровке с использованием метода гармонических колебаний определены уравнениями (62).

Практически при калибровке вместо текущих величин используются амплитудные или эффективные значения (при измерении стрелочным индикатором) либо размах (двойная амплитуда) — при визуальном наблюдении и регистрации на осциллографе. В последнем случае формулы (62) примут вид:

$$z = 2A; \quad v = 2\omega A; \quad a = 2\omega^2 A. \quad (69)$$

Из приведенных формул следует, что точность калибровки определяется точностью определения частоты и двойной амплитуды (размаха) колебаний.

Выше уже указывалось, что определение частоты может быть произведено с любой необходимой степенью точности.

Что касается измерения амплитуды колебаний, то дело обстоит значительно сложнее. Прежде всего следует отметить, что в настоящее время не существует единого средства, с помощью которого удалось бы с достаточной степенью точности измерять вибросмещения во всем диапазоне частот (от долей герца до 20—50 кгц) и амплитуд (от долей микрона до нескольких сантиметров). Поэтому, исходя из конкретных задач, применяют различные средства измерения смещений, причем наиболее распространенными являются оптические средства. При больших колебаниях (более 0,5 мм) с низкой частотой применяется оптический клин; при измерениях в полосе частот от 0 до 1 000 гц с погрешностью $\pm 1\%$ — микроскопы, а при измерениях очень малых амплитуд (до 1—2 мкм), имеющих место при колебаниях в диапазоне 10 кгц и выше, — интерферометр или лазер.

Наблюдения размытого изображения при амплитудах от нескольких миллиметров и более осуществляются невооруженным глазом, а при меньших — с помощью микроскопа с увеличением от 10 до 400 раз, снабженным измерительным окуляром. Весьма подходящими для этих целей являются микроскопы типа МПВ.

Частотная характеристика, полученная при градуировке в режиме установившихся гармонических колебаний, отражает поведение системы в случае резкого (ударного) изменения входной величины лишь частично. Для полной оценки прибора, предназначенного для работы в импульсном режиме, его следует проверять и градуировать также импульсной входной величиной.

Для создания ударных ускорений применяют в основном два типа установок — баллистические маятники и падающие молоты.

Баллистический маятник (рис. 47) состоит из двух масс, подвешенных на нитях, — «молота» и «наковальни».

Молот представляет собой стальную болванку, ударный конец которой имеет полусферическую форму, а другой конец снабжен механизмом для стопорения в отведенном состоянии. Наковальня изготовлена из алюминиевой или стальной болванки. На наковальню со стороны, обращенной к молоту, накидной гайкой можно закреплять демпфирующие диски из текстолита, стали или другого материала. С про-

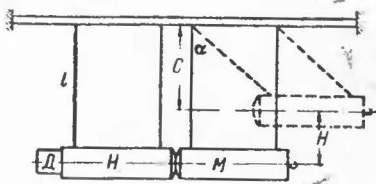


Рис. 47. Схема баллистического маятника.

М — молот; Н — наковальня; Д — датчик.

тивоположной стороны на наковальне имеется резбовое гнездо под градуируемый датчик.

При калибровке молот отводится на некоторый заданный угол и стопорится при помощи электромагнита; в нужный момент он освобождается от зацепления и ударяет по наковальне. При ударе возникает импульс ускорения, величина и длительность которого определяются высотой падения молота и жесткостью прокладки.

Форму кривой импульса ускорения, возникающего при ударе молота по наковальне через текстолитовую прокладку, с достаточной степенью точности можно принять за половину синусоиды. В этом случае максимальное значение ускорения можно определить по формуле

$$a_{\text{макс}} = \frac{\pi v_{\text{макс}}}{2g\tau}, \quad (70)$$

где $v_{\text{макс}}$ — максимальная скорость наковальни;

τ — длительность контакта молота с наковальней.

Измерение длительности контакта осуществляется с помощью электронного хронометра или цифрового частотомера.

Измерение максимальной скорости наковальни $v_{\text{макс}}$ может быть произведено одним из следующих способов.

По первому — оптическому — способу луч света фокусируется объективом на решетку и с двумя узкими щелями. Решетка жестко укрепляется на наковальне и при совместном движении с наковальней дважды пропускает свет на фотоэлемент, находящийся с другой стороны. Световой поток воспринимается фотоэлементом и, преобразованный в электрический сигнал, управляет электронным хронометром. По известным линейному расстоянию между щелями и времени между двумя электрическими импульсами определяется средняя скорость на участке от первой до второй щели.

Вместо модулирующей решетки с фотоэлементом используется пружинящий контакт, который прикрепляется к наковальне снизу и движется по неподвижному контакту фиксированной длины, закрепленному на жестком основании. Время контактирования, измеренное хронометром, позволяет определить среднюю скорость на участке контакта.

Второй способ основан на вычислении конечной скорости наковальни при ударе в предположении, что потери энергии на деформацию материала в точке контакта и трение в подвеске малы и ими можно пренебречь. Тогда можно считать, что вся кинетическая энергия молота полностью передается наковальне. При этих условиях максимальная скорость наковальни будет равна максимальной скорости молота и может быть определена по формуле

$$v_{\text{макс}} = \sqrt{2gH} = \sqrt{2gl(1 - \cos \alpha)} = \sqrt{2gl \left(1 - \frac{c}{l}\right)}, \quad (71)$$

где l — радиус качания;

H — высота подъема молота,

α — угол отклонения молота от вертикали.

Надежная калибровка акселерометров на баллистическом маятнике производится практически до ускорений порядка 500—1 000g. Для достижения больших ускорений и скоростей молот принудительно разгоняется с помощью различных катапульт и пневматических пушек. В последнем случае удается получать ускорения порядка 50—60 · 10³g.

Цена 23 коп.

-15